

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 10-154657

(43)Date of publication of application : 09.06.1998

(51)Int.Cl.

H01L 21/027
G02B 27/18
G03F 7/20

(21)Application number : 09-211059

(71)Applicant : NIKON CORP

(22)Date of filing : 05.08.1997

(72)Inventor : KIMURA YOKO
TANAKA KAZUMASA

(30)Priority

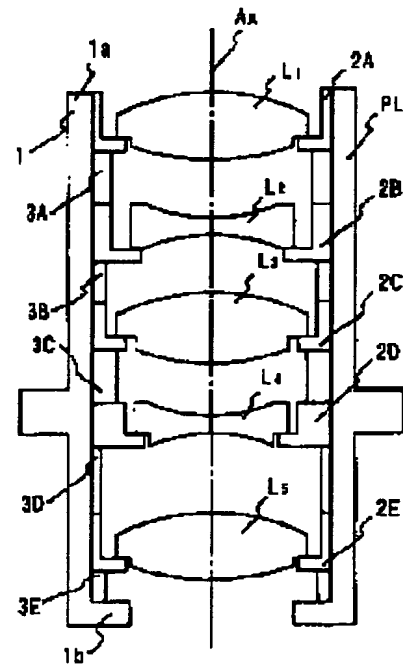
Priority number : 08255680 Priority date : 27.09.1996 Priority country : JP

(54) MANUFACTURE OF PROJECTION OPTICAL SYSTEM, PROJECTION ALIGNER, AND SEMICONDUCTOR DEVICE

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To eliminate an aberration component of higher-order from a projection optical system without incurring the malfunction of optical parts and the projection optical system itself by a method wherein an spherical surface which corrects the optical system for higher-order aberration left in it is provided to the optical member basing on the surface shape of the optical member, a space between the optical surfaces of the optical member, and the optical design data of the projection optical system.

SOLUTION: A plurality of optical members L1 to L5 are arranged in a prescribed order and assembled into a projection optical system PL. The projection optical system PL is corrected for aberration of higher-order by turning the optical surface (refracting surface of the like) of an optical member inside the projection optical system PL spherical (fine spherical surface) after one out of the plurality of optical members L1 to L5 comprising the projection optical system PL is moved (the optical members L1 to L5 are changed in space between them, moved in the direction of an optical axis or in the direction vertical to an optical axis, an tilted) to adjust the assembled projection optical system PL or the optical members L1 to L5 are assembled into a projection optical system PL.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than
the examiner's decision of rejection or
application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision
of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's
decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公 開 特 許 公 報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平10-154657

(43)公開日 平成10年(1998) 6月9日

(51)Int.Cl. ⁵	識別記号	F I
H 0 1 L 21/027		H 0 1 L 21/30
G 0 2 B 27/18		G 0 2 B 27/18
G 0 3 F 7/20	5 2 1	G 0 3 F 7/20

審査請求 未請求 請求項の数18 O L (全 29 頁)

(21)出願番号 特願平9-211059

(22)出願日 平成9年(1997) 8月5日

(31)優先権主張番号 特願平8-255680

(32)優先日 平8(1996) 9月27日

(33)優先権主張国 日本 (J P)

(71)出願人 000004112

株式会社ニコン

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号

(72)発明者 木村 陽子

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株式会社ニコン内

(72)発明者 田中 一政

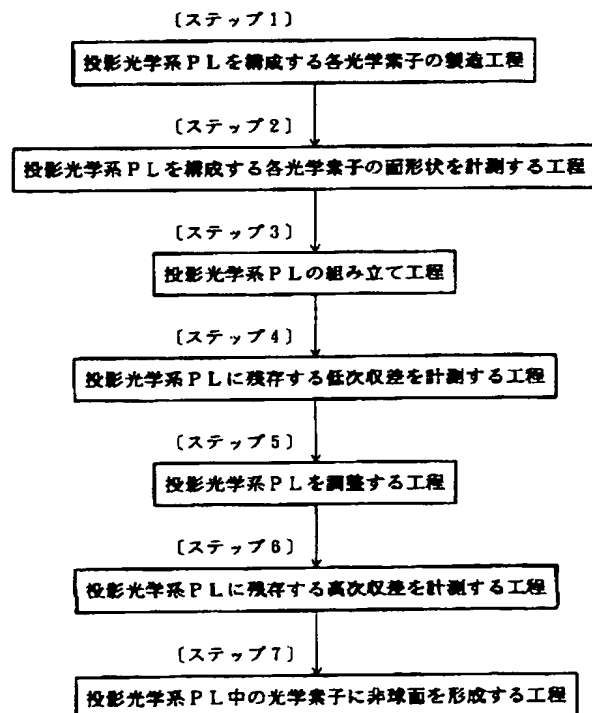
東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株式会社ニコン内

(54)【発明の名称】 投影光学系の製造方法、投影露光装置および半導体装置の製造方法

(57)【要約】

【課題】高次の収差成分が除去し得る投影光学系の製造方法、マスクパターンを感光性基板に良好に投影露光し得る投影露光装置、さらにはより高い集積度を持つ半導体素子を始めとした各種の素子の製造方法の提供にある。

【解決手段】 複数の光学部材を用いて投影光学系を組み立てるに先立って計測された複数の光学部材の光学面の形状に関する情報と、その複数の光学部材を用いて投影光学系を組み立て中または組み立て後に前記複数の光学部材の配置に関する情報とを用いて、投影光学系に残存する収差を除去する非球面を前記複数の光学部材に形成する。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】第 1 物体の像を第 2 物体上へ投影するための投影光学系の製造方法において、

前記投影光学系を構成すべき複数の光学部材を製造する第 1 工程と、

該第 1 工程によって製造された複数の光学部材の光学面の面形状をそれぞれ計測する第 2 工程と、

前記第 1 工程にて製造された前記複数の光学部材を用いて投影光学系を組み立てる第 3 工程と、

該第 3 工程後にて前記投影光学系に残存する収差を計測するための第 4 工程と、

該第 4 工程によって計測された収差を補正するために前記投影光学系を調整すると共に、該調整中又は調整完了時での前記投影光学系を構成する前記複数の光学部材間の光学面の間隔を求める第 5 工程と、

前記第 5 工程後にて前記投影光学系に残存する高次の収差を計測する第 6 工程と、

前記第 2 工程にて得られた各光学部材の面形状の情報と、前記第 5 工程にて得られた前記複数の光学部材間の光学面の間隔の情報と、前記投影光学系の光学設計情報とに基づいて、前記第 6 工程にて得られた残存する高次収差量を補正する非球面を前記複数の光学部材の少なくとも 1 つに形成する第 7 工程とを有することを特徴とする投影光学系の製造方法。

【請求項 2】前記第 7 工程にて形成される前記非球面は、前記投影光学系の光軸方向における前記非球面の最大変化量を S とし、露光波長を λ 、前記非球面が形成されている前記光学部材の屈折率を n とするとき、

$$0.02 < S(n-1)/\lambda < 0.483$$

を満足することを特徴とする請求項 1 記載の投影光学系の製造方法。

【請求項 3】前記非球面を前記光学部材の屈折面に形成し、該屈折面の曲率を C とするとき、

$$|C| < 0.02$$

を満足することを特徴とする請求項 1 または請求項 2 に記載の投影光学系の製造方法。

【請求項 4】前記投影光学系の最も第 1 物体側の光学部材の屈折面から前記投影光学系の最も第 2 物体側の光学部材の屈折面までの光軸に沿った長さを D とし、前記投影光学系の最も第 1 物体側の光学部材の屈折面から前記非球面が形成される光学部材の屈折面までの光軸に沿った距離を d とするとき、

$$0 \leq d/D < 0.37$$

の条件を満足することを特徴とする請求項 1 から請求項 3 のいずれかに記載の投影光学系の製造方法。

【請求項 5】前記非球面は、光軸からの高さを h とし、光軸からの高さ h における非球面上の点からレンズ頂点での接平面までの光軸に沿った距離を $X(h)$ 、近軸の曲率半径を r 、円錐定数を k 、少なくとも 1 から 12 までの自然数を n 、 n 次の非球面係数を C_n とするとき、

以下の式を満足する特徴とする請求項 1 から請求項 4 のいずれかに記載の投影光学系の製造方法。

$$X(h) = A / [1 + (1 - kA/r)^{0.5}] + C_1 h^1 + C_2 h^2 + C_3 h^3 + C_4 h^4 + \dots + C_n h^n$$

但し、 $A = h^2 / r$ である。

【請求項 6】照明光学系からの露光光をマスク上に形成されたパターンに照明し、該パターンを投影光学系を介して感光性基板に露光する投影露光装置において、

前記投影光学系は、前記パターンの像を前記感光性基板に形成するための複数の光学部材を有し、

前記投影光学系に残存する収差成分を補正するための非球面を前記複数の光学部材の少なくとも 1 つに形成し、前記投影光学系の光軸方向における前記非球面の最大変化量を S とし、露光波長を λ 、前記非球面が形成されている前記光学部材の屈折率を n とするとき、

$$0.02 < S(n-1)/\lambda < 0.483$$

を満足することを特徴とする投影露光装置。

【請求項 7】前記非球面を前記光学部材の屈折面に形成し、該屈折面の曲率を C とするとき、

$$|C| < 0.02$$

を満足することを特徴とする請求項 6 に記載の投影露光装置。

【請求項 8】前記投影光学系の最もマスク側の光学部材の屈折面から前記投影光学系の最も感光性基板側の光学部材の屈折面までの光軸に沿った長さを D とし、前記投影光学系の最もマスク側の光学部材の屈折面から前記非球面が形成される光学部材の屈折面までの光軸に沿った距離を d とするとき、

$$0 \leq d/D < 0.37$$

の条件を満足することを特徴とする請求項 6 または請求項 7 に記載の投影露光装置。

【請求項 9】前記非球面は、光軸からの高さを h とし、光軸からの高さ h における非球面上の点からレンズ頂点での接平面までの光軸に沿った距離を $X(h)$ 、近軸の曲率半径を r 、円錐定数を k 、少なくとも 1 から 12 までの自然数を n 、 n 次の非球面係数を C_n とするとき、以下の式を満足する特徴とする請求項 6 から請求項 8 のいずれかに記載の投影露光装置。

$$X(h) = A / [1 + (1 - kA/r)^{0.5}] + C_1 h^1 + C_2 h^2 + C_3 h^3 + C_4 h^4 + \dots + C_n h^n$$

但し、 $A = h^2 / r$ である。

【請求項 10】半導体素子を製造する方法において、露光光をマスク上に形成された所定のパターンに照明する工程と、

前記パターンを投影光学系を介して感光性基板に投影露光する工程とを有し、

前記投影光学系は、前記パターンの像を前記感光性基板に形成するための複数の光学部材を有し、

前記投影光学系に残存する収差成分を補正するための非球面を前記複数の光学部材の少なくとも1つに形成し、前記投影光学系の光軸方向における前記非球面の最大変化量を S とし、露光波長を λ 、前記非球面が形成されている前記光学部材の屈折率を n とすると、

$$0.02 < S(n-1)/\lambda < 0.483$$

を満足することを特徴とする半導体装置の製造方法。

【請求項11】前記非球面を前記光学部材の屈折面に形成し、該屈折面の曲率を C とすると、

$$|C| < 0.02$$

を満足することを特徴とする請求項10に記載の半導体装置の製造方法。

【請求項12】前記投影光学系の最もマスク側の光学部材の屈折面から前記投影光学系の最も感光性基板側の光学部材の屈折面までの光軸に沿った長さを D とし、前記投影光学系の最もマスク側の光学部材の屈折面から前記非球面が形成される光学部材の屈折面までの光軸に沿った距離を d とすると、

$$0 \leq d/D < 0.37$$

の条件を満足することを特徴とする請求項10または請求項11に記載の半導体装置の製造方法。

【請求項13】前記非球面は、光軸からの高さを h とし、光軸からの高さ h における非球面上の点からレンズ頂点での接平面までの光軸に沿った距離を $X(h)$ 、近軸の曲率半径を r 、円錐定数を k 、少なくとも1から12までの自然数を n 、 n 次の非球面係数を C_n とすると、以下の式を満足する特徴とする請求項10から請求項12のいずれかに記載の半導体装置の製造方法。

$$X(h) = A / [1 + (1 - kA/r)^{0.5}] + C_1 h^1 + C_2 h^2 + C_3 h^3 + C_4 h^4 + \dots + C_n h^n$$

但し、 $A = h^2/r$ である。

【請求項14】複数の光学部材を用いて所定の順序で組み立てることにより、第1物体の像を第2物体上へ投影するための投影光学系を製造する方法において、複数の光学部材を用いて前記投影光学系を組み立てるに先立って複数の光学部材の光学面の形状を計測する第1工程と、前記複数の光学部材を用いて投影光学系を組み立て中又は組み立て後に前記複数の光学部材の配置に関する情報を得る第2工程と、前記第1工程にて得られた前記複数の光学部材の光学面の形状に関する情報と、前記第2工程にて得られた前記複数の光学部材の配置に関する情報を得る工程とに基づいて、前記投影光学系に残存する収差を除去する非球面を前記複数の光学部材の少なくとも1つに形成する第3工程を有することを特徴とする投影光学系の製造方法。

【請求項15】前記第3工程にて形成される前記非球面は、前記投影光学系の光軸方向における前記非球面の最大変化量を S とし、露光波長を λ 、前記非球面が形成されている前記光学部材の屈折率を n とすると、

$$0.02 < S(n-1)/\lambda < 0.483$$

を満足することを特徴とする請求項14記載の投影光学系の製造方法。

【請求項16】前記非球面を前記光学部材の屈折面に形成し、該屈折面の曲率を C とすると、

$$|C| < 0.02$$

を満足することを特徴とする請求項14または請求項15に記載の投影光学系の製造方法。

【請求項17】前記投影光学系の最も第1物体側の光学部材の屈折面から前記投影光学系の最も第2物体側の光学部材の屈折面までの光軸に沿った長さを D とし、前記投影光学系の最も第1物体側の光学部材の屈折面から前記非球面が形成される光学部材の屈折面までの光軸に沿った距離を d とすると、

$$0 \leq d/D < 0.37$$

の条件を満足することを特徴とする請求項14から請求項16のいずれかに記載の投影光学系の製造方法。

【請求項18】前記非球面は、光軸からの高さを h とし、光軸からの高さ h における非球面上の点からレンズ頂点での接平面までの光軸に沿った距離を $X(h)$ 、近軸の曲率半径を r 、円錐定数を k 、少なくとも1から12までの自然数を n 、 n 次の非球面係数を C_n とすると、以下の式を満足する特徴とする請求項14から請求項17のいずれかに記載の投影光学系の製造方法。

$$X(h) = A / [1 + (1 - kA/r)^{0.5}] + C_1 h^1 + C_2 h^2 + C_3 h^3 + C_4 h^4 + \dots + C_n h^n$$

但し、 $A = h^2/r$ である。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、所定のパターンが形成されたマスクを感光性基板上に投影露光する投影露光装置、その投影光学系の製造等に関するものであり、特に、LSI等の半導体素子、液晶表示素子、又は薄膜磁気ヘッド等を製造するためのフォトリソグラフィ工程で用いられる投影露光装置等に好適なものである。

【0002】

【従来の技術】半導体素子、液晶表示素子、又は薄膜磁気ヘッド等を製造するために用いられる露光装置として、所定のパターンが形成された投影原版としてのマスクを投影光学系を介して感光性基板上に投影露光するのが知られている。このような投影光学系としては、露光波長の光に対して透過性の光学特性を持つ屈折性の光学素子等のレンズで構成される屈折型の投影光学系、屈折性の光学素子としてのレンズと反射性の光学素子としてのミラーとを組み合わせた反射屈折型の投影光学系、さらには全て反射性の光学素子としてのミラーで構成される反射型の投影光学系が知られている。

【0003】以上の各投影光学系を用いてマスクパターンを感光性基板に投影する際の投影倍率としては、製造

する素子に応じて、縮小、等倍あるいは拡大するものがある。

【0004】

【発明が解決しようとする課題】以上の各種の素子を製造する際に用いられる露光装置の投影光学系は、微細なマスクパターンを感光性基板上に投影するために、一般に、高解像力で無収差に近い状態なる非常に高い光学性能が要求される。従って、近年にて要求される仕様を満たす投影光学系を実現するには、投影光学系を製造するための技術が1つの大きな要因となる。このため、投影光学系を構成する例えばレンズ等の光学部材自身の製造誤差、または投影光学系を製造する際に、複数の光学部材を組み込んだ段階で生ずる組立て製造誤差等による誤差をレンズ等の光学部材を保持する鏡筒内部のワッシャの厚み等を変更することにより、各光学部材の間隔を調整して、製造時に発生あるいは残存する低次の収差を補正することができる。

【0005】しかしながら、以上の従来の投影光学系の調整手法では、製造時に発生あるいは残存する高次の収差を補正することが不可能であった。すなわち、レンズ等の光学部材自身に残存する微小な製造誤差や、光学部材の間隔を調整しても残存する微小な収差成分（例えば、高次の像面湾曲、高次のディストーション等）等を取り除くことが困難であった。

【0006】従って、光学素子、組立調整した投影光学系が不良となる事態が頻繁に生じ、高い光学性能を有する投影光学系が設計できたとしても、投影光学系を製造することが極めて困難である。このため、ますます微細となるマスクパターンを投影光学系によって感光性基板上に投影露光して、より高い集積度を持つ半導体素子等の各種の素子を製造することは困難となる。

【0007】従って、本発明は、以上の課題に鑑みてなされたものであり、投影光学系を構成する光学部品の不良や、投影光学系自身の不良を招くことなく、高次の収差成分が除去された高い光学性能を持つ投影光学系の製造を可能とし得る。このため、本発明では、高次の収差成分が除去し得る投影光学系の製造方法、マスクパターンを感光性基板上に良好に投影露光し得る投影露光装置、さらにはより高い集積度を持つ半導体素子を始めたとした各種の素子の製造方法を提供することを目的とする。

【0008】

【課題を解決するための手段】以上の目的を実現するために、本発明の第1の態様によれば、マスク上に形成された所定のパターンを感光性基板上に投影露光するための投影光学系の製造方法において、前記投影光学系を構成すべき複数の光学部材を製造する第1工程と、該第1工程によって製造された複数の光学部材の光学面の面形状をそれぞれ計測する第2工程と、前記第1工程にて製造された前記複数の光学部材を用いて投影光学系を組み立てる第3工程と、該第3工程後にて前記投影光学系に残

存する収差を計測するための第4工程と、該第4工程によって計測された収差を補正するために前記投影光学系を調整すると共に、該調整中又は調整完了時での前記投影光学系を構成する前記複数の光学部材間の光学面の間隔を求める第5工程と、前記第5工程後にて前記投影光学系に残存する高次の収差を計測する第6工程と、前記第2工程にて得られた各光学部材の面形状の情報と、前記第5工程にて得られた前記複数の光学部材間の光学面の間隔の情報と、前記投影光学系の光学設計情報とに基づいて、前記第6工程にて得られた残存する高次収差量を補正する非球面を前記複数の光学部材の少なくとも1つに形成する第7工程とを有することを要する。

【0009】このとき、前記第7工程にて形成される前記非球面は、前記投影光学系の光軸方向における前記非球面の最大変化量を S とし、露光波長を λ 、前記非球面が形成されている前記光学部材の屈折率を n とすると

$$0.02 < S(n-1)/\lambda < 0.483$$

を満足することが好ましい。

【0010】また、本発明の第2の態様によれば、露光光をマスク上に形成されたパターンに照明し、該パターンを投影光学系を介して感光性基板上に露光する投影露光装置において、前記投影光学系は、前記パターンの像を前記感光性基板上に形成するための複数の光学部材を有し、前記投影光学系に残存する収差成分を補正するための非球面を前記複数の光学部材の少なくとも1つに形成し、前記投影光学系の光軸方向における前記非球面の最大変化量を S とし、露光波長を λ 、前記非球面が形成されている前記光学部材の屈折率を n とすると

$$0.02 < S(n-1)/\lambda < 0.483$$

を満足するものである。

【0011】また、本発明の第3の態様によれば、半導体装置の製造する方法において、露光光をマスク上に形成された所定のパターンに照明する工程と、前記パターンを投影光学系を介して感光性基板上に投影露光する工程とを有し、前記投影光学系は、前記パターンの像を前記感光性基板上に形成するための複数の光学部材を有し、前記投影光学系に残存する収差成分を補正するための非球面を前記複数の光学部材の少なくとも1つに形成し、前記投影光学系の光軸方向における前記非球面の最大変化量を S とし、露光波長を λ 、前記非球面が形成されている前記光学部材の屈折率を n とすると

$$0.02 < S(n-1)/\lambda < 0.483$$

を満足することである。

【0012】また、本発明の第4の態様によれば、複数の光学部材を用いて所定の順序で組み立てることにより、第1物体の像を第2物体上へ投影するための投影光学系を製造する方法において、複数の光学部材を用いて前記投影光学系を組み立てるに先立って複数の光学部材の光学面の形状を計測する第1工程と、前記複数の光学

部材を用いて投影光学系を組み立て中又は組み立て後に前記複数の光学部材の配置に関する情報を得る第2工程と、前記第1工程にて得られた前記複数の光学部材の光学面の形状に関する情報と、前記第2工程にて得られた前記複数の光学部材の配置に関する情報を得る工程とに基づいて、前記投影光学系に残存する収差を除去する非球面を前記複数の光学部材の少なくとも1つに形成する第3工程を有するものである。

【0013】そして、以上の第1～第4の態様とも、前記非球面を前記光学部材の屈折面に形成し、該屈折面の曲率をCとすると、

$$|C| < 0.02 \quad (1/\text{mm})$$

を満足することが望ましい。また、以上の第1～第4の態様とも、前記投影光学系の最も第1物体側（マスク側）の光学部材の屈折面から前記投影光学系の最も第2物体側（感光性基板側）の光学部材の屈折面までの光軸に沿った長さをDとし、前記投影光学系の最も第1物体側（マスク側）の光学部材の屈折面から前記非球面が形成される光学部材の屈折面までの光軸に沿った距離をdとすると、

$$0 < d/D < 0.37$$

の条件を満足する構成としても良い。

【0014】

【発明の実施の形態】複数の光学部材を所定の順序で配置して投影光学系を組み立て、投影光学系を構成する複数の光学部材の少なくとも1つの位置を移動（光学部材間の間隔を変化、光学部材を光軸方向または光軸と直交する方向へ移動、さらには光学部材を傾斜等）させて組立て調整の完了後、あるいは複数の光学部材を用いて投影光学系を組み立て完了後（例えば、投影光学系の調整

$$(1) \quad 0.02 < S(n-1)/\lambda < 0.483$$

上記(1)式の下限を越えると、非球面としての効果が薄れるため好ましくない。上記(1)式の上限を越えると、非球面の屈折力が大きくなり過ぎるため、高次数の収差をコントロールすることが困難となる。しかも、この場合、加工されるべき非球面の研磨上での要求される精度を出すことが困難となるため、非球面加工ができな

$$(2) \quad |C| < 0.02 \quad (1/\text{mm})$$

上記(2)式の上限を越えると、非球面が形成されるべき屈折面での屈折力が大きくなるため、非球面の研磨上での要求される精度を出すことが困難となり、非球面加工が難しくなる。

【0018】また、投影光学系の最もマスク側の光学部材の屈折面から投影光学系の最も感光性基板側の光学部材の屈折面までの光軸に沿った長さをDとし、投影光学系の最もマスク側の光学部材の屈折面から非球面が形成される光学部材の屈折面までの光軸に沿った距離をdとすると、以下の条件(3)を満足することがより好ましい。

$$(3) \quad 0 \leq d/D < 0.37$$

を含めた投影光学系を組み立て工程等の完了後）において、本発明では、投影光学系に残存する高次数の収差成分を、投影光学系内のある光学部材の光学面（屈折面等）を非球面（微小非球面）化することにより補正している。ここで言う非球面（微小非球面）とは、ある所望の仕様を持つ投影光学系を実現するために、設計時に積極的に収差を補正するために導入された非球面とは異なり、複数の光学部材を用いて投影光学系を組み立てて製造する、例えば組立て調整した際に、光学部品自体の製造誤差並びに投影光学系の調整誤差等により除去困難な残存する高次の収差を補正するものである。

【0015】この時の非球面は、複数の光学部材を用いて投影光学系を組み立て後に調整する、あるいは複数の光学部材を用いて投影光学系を組み立てる（例えば、投影光学系の調整を含めた投影光学系を組み立て工程等）に先立って複数の光学部材の光学面の形状を計測して得られた第1の情報と、複数の光学部材を用いて投影光学系を組み立て中または組み立て完了段階にて得られた複数の光学部材の配置に関する第2情報とに基づいて決定される。この場合、複数の光学部材を用いた投影光学系の組み立てが完了した段階での投影光学系の残存収差を計測し、その計測された収差量は、上記第1及び第2情報を用いて非球面の形状、位置、数を決定する際の目標値とされることが好ましい。

【0016】ここで、本発明による非球面としては、投影光学系の光軸方向における前記非球面の最大変化量をSとし、前記非球面が形成されている前記光学部材の屈折率をnとすると、以下の(1)式を満足することが好ましい。

くなる。

【0017】また、本発明による非球面を投影光学系を構成するある光学部材（レンズ）の少なくとも一方の屈折面（レンズ面、屈折性平面等）に形成し、その屈折面の近軸での曲率をCとすると、以下の(2)式を満足することが望ましい。

上記(3)式は、高次の収差としてのディストーションや像面弯曲を良好に補正することができる投影光学系に対する非球面の最適な位置を規定するものである。

【0019】上記(3)式の上限及び下限を越えると、高次の収差としてのディストーションや像面弯曲を良好に補正することが困難となるため好ましくない。特に、高次の像面弯曲をより良好に補正するためには、投影光学系内の屈折面に形成される非球面は以下の(4)式を満足する位置に設けられることがより好ましい。

$$(4) \quad 0.05 < d/D < 0.37$$

また、高次のディストーションをよりバランス良く補正するためには、投影光学系内の屈折面に形成される非球

面は以下の(5)式を満足する位置に設けられることがより好ましい。

$$(5) \quad 0 \leq d/D < 0.14$$

以上にて述べた本発明による非球面が光軸に対して回転対称な形状である場合には、その非球面は、例えば、光軸からの高さを h とし、光軸からの高さ h における非球

$$\begin{aligned} X(h) = & A / [1 + (1 - kA/r)^{0.5}] \\ & + C_1 h^1 + C_2 h^2 + C_3 h^3 + C_4 h^4 \\ & + \dots + C_n h^n \\ A = & h^2 / r \end{aligned} \quad \dots \dots (6)$$

また、本発明による非球面は、上記(6)式の奇数次の非球面係数を零として、以下の(6)の如く表現するこ

$$\begin{aligned} X(h) = & A / [1 + (1 - kA/r)^{0.5}] \\ & + C_2 h^2 + C_4 h^4 + C_6 h^6 + C_8 h^8 + C_{10} h^{10} \\ & + \dots + C_{2i} h^{2i} \\ A = & h^2 / r \end{aligned} \quad \dots \dots (7)$$

但し、 h は光軸からの高さ、 $X(h)$ は光軸からの高さ h における非球面上の点からレンズ頂点での接平面までの光軸に沿った距離、 r は近軸の曲率半径、 k は円錐定数、 i は自然数、 C_{2i} は $2i$ 次の非球面係数である。

【0022】ここで、光軸に対して回転対称な非球面形状を構成する場合、本発明による非球面は、少なくとも12次までの高次の項(上記(6)式では n を少なくとも1から12までの自然数とした時での高次の項、上記(7)式では i を少なくとも1から6までの自然数とした時での高次の項)を加味した形状とすることが好ましい。これにより、投影光学系に残存する高次の収差を補正することが可能となる。

【0023】また、本発明による非球面は、上記(6)式及び(7)式にて示した光軸に対して回転対称のみならず光軸に対して回転非対称の形状で構成されても良い事は言うまでもない。さて、次に本発明による実施例について添付図面を参照しながら説明する。図1には、投影光学系PLを備えた露光装置の様子を示す図である。

【0024】図1に示す如く、投影光学系PLの物体面には所定の回路パターンが形成された投影原版としてのマスク(レチクル)Rが配置されており、マスクRはマスクステージRSに保持されている。一方、投影光学系PLの像面には、感光性基板として、レジストが塗布されたウエハWが配置されており、このウエハWは投影光学系の光軸Axと直交する面内で2次元的に移動するウエハステージWSに保持されている。このウエハステージWSは、投影光学系の光軸Axと直交する面内で2次元的に移動するのみならず、さらに、投影光学系PLの像面(露光面)とウエハWの表面とを合致(合焦)させるために、投影光学系の光軸方Axに移動可能に設けられており、投影光学系PLの像面(露光面)とウエハWの表面との合焦は、ウエハステージWSの斜め上方に配置された斜入射オートフォーカス系(AF1、AF2)によって光学系的に検出される。

面上の点からレンズ頂点での接平面までの光軸に沿った距離を $X(h)$ 、近軸の曲率半径を r 、円錐定数を k 、自然数を n 、 n 次の非球面係数を C_n とすると、次式(6)で表現することができる。

$$【0020】$$

ともできる。

$$【0021】$$

【0025】斜入射オートフォーカス系は、投射部AF1からの投射光がウエハWの表面にて反射される際に、検出部AF2にて受光される光の位置を検出することにより、投影光学系PLの像面(露光面)とウエハWの表面との合焦状態を光電的に検出する。なお、マスクステージRSは、マスクステージRSの位置を計測する干渉計と駆動モータを含む駆動系MRによって2次元的に移動し、ウエハステージWSは、ウエハステージWSの位置を計測する干渉計と駆動モータを含む駆動系MWによって2次元移動並びに光軸Axの方向へ移動する。そして、制御系MCは、マスクステージRSの位置を計測する駆動系MRの内部の干渉計からのウエハステージWSの位置情報に基づいて駆動系MRの駆動量を制御すると共に、ウエハステージWSの位置を計測する駆動系MWの内部の干渉計からのウエハステージWSの位置情報に基づいて駆動系MWの駆動量を制御する。さらに、制御系MCは、斜入射オートフォーカス系(AF1、AF2)からの出力に基づいてウエハステージWSの光軸Axに沿った方向での位置の制御を駆動系MWを介して行っている。

【0026】また、マスクRの上方には、マスクRを均一に照明するための照明光学系ISが設けられており、この照明光学系の内部には、248.4nmの露光波長の光を発振するエキシマレーザー光源が設けられている。そして、そのエキシマレーザー光源から供給されるレーザー光は、マスク上に所定の矩形形状の照明領域を形成し、この時、投影光学系PLの瞳位置に設けられた開口絞りASの位置には、エキシマレーザーの光源像が形成され、所謂ケーラー照明がなされる。このように、ケーラー照明によって均一照明されたマスクRの像が投影光学系PLを通してウエハW上に露光(転写)される。

【0027】そして、ウエハW上におけるあるショット領域でのマスクR上のパターンの露光が完了すると、そのウエハW上の隣のショット領域へウエハステージを移

動させて、隣のショット領域での露光を行い、さらに隣へのショット領域への露光のためにウエハステージWSを順次移動させて露光を行う所謂ステップ・アンド・リピート方式で露光が行われる。

【0028】なお、本発明では、ステップ・アンド・リピート方式の露光装置に限ることなく、例えば、図19に示す如く、マスクR上のパターンを投影光学系PLを介してウエハ上に露光する際に、マスクステージRSとウエハステージWSとを相対的に移動、即ちマスクRとウエハWとを移動させて走査露光する走査型露光装置にも適用することができる。この場合の走査型露光装置は、照明光学系ISからの露光光によってスリット状（長方形）または円弧状となる照明領域IFでマスクR上を照明し、これによって、ウエハW上にスリット状（長方形）または円弧状となる露光領域EFを形成する構成とされることが望ましい。

【0029】以上の露光装置による露光の工程を経たウエハは、現像する工程を経てから現像したレジスト以外の部分を除去するエッチングの工程、エッチングの工程後の不要なレジストを除去するレジスト除去の工程等を経てウエハプロセスが終了する。そして、ウエハプロセスが終了すると、実際の組立工程にて、焼き付けられた回路毎にウエハを切断してチップ化するダイシング、各チップに配線等を付与するボンディング、各チップ毎にパッケージングするパッケージング等の各工程を経て、最終的に半導体装置（LSI等）が製造される。なお、以上には、投影露光装置を用いたウエハプロセスでのフォトリソグラフィ工程により半導体素子を製造する例を示したが、投影露光装置を用いたフォトリソグラフィ工程によって、半導体装置として、液晶表示素子、薄膜磁気ヘッド、撮像素子（CCD等）を製造することができる。

【0030】以上の図1に示した如き構成を持つ投影露光装置によるフォトリソグラフィ工程によって半導体装置等を製造することができるが、マスクRのパターンをウエハ上に投影する投影露光装置の投影光学系が高い光学性能を持つことがフォトリソグラフィ工程にて重要となる。そこで、投影露光装置用の投影光学系を製造する際での本発明における投影光学系の調整方法に関して図2を参照しながら説明する。

【0031】図2は本発明による投影露光装置用の投影光学系の製造する際の調整方法に関する手順を示す図である。

〔ステップ1〕ステップ1では、まず、図4に示す如く、所定の設計レンズデータによる設計値に従って投影光学系PLを構成する各光学部材としての各レンズ素子（L1～L5）、並びに各レンズを保持する保持枠、レンズ素子と保持枠とからなる保持ユニットを収納する鏡筒を製造する。すなわち、各レンズ素子（L1～L5）は、周知のレンズ加工機を用いて所定の光学材料からそ

れぞれ所定の設計値に従う曲率半径、軸上厚を持つように加工され、また各レンズを保持する保持枠、レンズ素子と保持枠とからなる保持ユニットを収納する鏡筒は、周知の金属加工機等を用いて所定の保持材料（ステンレス、真鍮、セラミック等）からそれぞれ所定の寸法を持つ形状に加工される。

〔ステップ2〕ステップ2では、ステップ1にて製造された投影光学系PLを構成する各レンズ素子（L1～L5）のレンズ面の面形状を例えばフィゾー型の干涉計を用いて計測する。図6には、光学素子の表面の形状を計測するフィゾー型の干涉計の1例が示してある。図6に示す如く、633nmの波長λの光を発するHe-Ne気体レーザや363nmの波長λの光を発するArレーザ、248nmの波長λに高調波化されたArレーザ等のレーザ光源11からの光は、レンズ12を介してビームスプリッタ13を反射し、コリメーターレンズ14によって平行光束に変換される。その平行光束は、集光レンズ15を介して被検物としてのレンズ18の被検面（レンズ面）Sを照射する。ここで、集光レンズ15には参照面が形成されており、光の1部は集光レンズ15の参照面で反射し、残りの光は集光レンズ15を通過して被検面Sで反射される。これらの反射光の波面は、それぞれ参照面と被検面Sの形状に応じた形状となる。これらの反射光は同一光路を辿って戻ることにより互いに重ね合わせられ、コリメーターレンズ14、ビームスプリッタ13、結像レンズ16を介してCCD等の撮像装置17の撮像面に結像される。この時、撮像装置17の撮像面には、両反射光の干涉による干涉縞が形成され、その干涉縞を計測することにより被検面Sの形状を正確に求めることができる。なお、フィゾー型の干涉計を用いてレンズ等の光学素子の表面（レンズ面）の形状を求めることは公知であり、この事は、例えば、特開平62-126305号、特開平6-185997号等にて開示されている。

【0032】以上の如く、フィゾー型の干涉計を用いた光学素子の面形状の計測は、投影光学系PLを構成する各レンズ素子（L1～L5）の全てのレンズ面に関して行われる。そして、図3に示す如く、各計測した結果をコンソール等の入力系6を介してコンピュータ、計算機等の演算系7のメモリー部に記憶させる。

〔ステップ3〕ステップ2での投影光学系PLを構成する各レンズ素子（L1～L5）の全てのレンズ面の面形状の計測が完了した後、例えば、図4に示される如く、設計値に従って加工製造された光学ユニット、すなわち、レンズ等の光学素子（L1～L5）とその光学素子（L1～L5）を保持する保持枠（2A～2E）とで5つの光学ユニットそれぞれ組み上げる。そして、組み上げられた5つの光学ユニットを、鏡筒1の上部開口1aを介して順次、ワッシャ（3A～3E）を介在させながら鏡筒1内に落とし込むように組み上げていく。そし

て、最初に鏡筒1内に落としこまれた光学ユニット(L5、2E)は、鏡筒1の先端(ウエハ側)に形成された突出部1bにてワッシャ3Eを介して支持され、全ての光学ユニットが鏡筒1内に収容されることにより組み込む工程が完了する。この組み立て工程と平行して、保持ユニットと共に鏡筒内に収納されるワッシャ(3A~3E)の厚さを加味しながら工具(マイクロメータ等)を用いて、各レンズ素子の光学面(レンズ面)の間隔に関する情報を計測する。そして、投影光学系の組み上げ作業との計測作業とを交互に行いながら、ステップ3の組み上げ工程完了した段階での投影光学系PLの最終的な各レンズ素子の光学面(レンズ面)の間隔を求める。

【0033】このように、図3に示す如く、組み立て工程中または組み立て完了時での投影光学系PLの各レンズ素子の光学面(レンズ面)間の間隔に関する計測結果をコンソール等の入力系6を介してコンピュータ、計算機等の演算系7のメモリー部に記憶させる。なお、以上の組み込む工程に際して、必要に応じて光学ユニットを調整しても良い。このとき、例えば、ワッシャ(3A~3E)の交換により光学素子間の光軸方向での相対間隔を変化、あるいは光軸に対して光学素子を傾斜させる。また、鏡筒1の側面を貫通する雌螺子部を通して螺合するビスの先端が保持枠に当接するように鏡筒1を構成し、そのビスをドライバー等の工具を介して移動させることにより、保持部材間を光軸と直交する方向へずらし、偏心等の調整をしても良い。この事は、例えば特開平7-35963号公報に開示されている。

【0034】また、保持枠(2A~2E)は、1つの光学素子を保持するものに限らず、複数の光学素子を同時保持する、即ちレンズ群を保持する構造であっても良い。また、図5に示す如く、各光学素子毎、または各レンズ群毎に光学素子を直接鏡筒(4A~4E)で保持し、その各鏡筒(4A~4E)をワッシャ(5A~5D)等を介在させながら積み上げて光学系を組み立てる、所謂分割鏡筒方式で投影光学系PLを組み立てても良い。

〔ステップ4〕次に、ステップ4では、図4又は図5に示す如く、ステップ3にて組み上がった投影光学系PLに残存する低次の収差を計測する。

【0035】具体的には、一旦、投影光学系を図1に示す如き投影露光装置本体(又は投影露光装置本体と同じ構成を持つ検査機)に取り付け、図7及び図8に示す如きテストマスク(TR1、TR2)を用いて、各種の収差(球面収差、コマ収差、非点収差、像面弯曲、歪曲収差等)を測定する。収差測定の一例として、像面弯曲の測定の場合には、図1に示す如き装置(または図1に示す構成を持つ検査機)に検査対象の投影光学系PLを取り付けると共に、図7に示すテストマスクTR1をマスクステージRSに保持する。この時のテストマスクTR1は、XY平面内にて複数のマークが形成されたテスト

パターン領域PA1とその周辺に形成された遮光帯LSTとを有しており、そのテストパターン領域PA1には、例えば、Y方向に所定のピッチを持つY方向マーク M_1 と、X方向に所定のピッチを持つX方向マーク M_2 と、XY方向に対して斜め45度の方向に沿って所定のピッチを持つ斜め方向マーク(M_3 、 M_4)との4つのマークを持つマーク群が17か所に形成されている。

【0036】図7に示す如きテストマスクTR1を用いて、そのテストマスクTR1を検査対象の投影光学系PLを介して感光性基板としてのウエハ上所定のショット領域に焼き付ける。そして、ウエハステージWSを2次元的に移動させて投影光学系の露光領域を、上記所定のショット領域とは異なるショット領域に位置させ、斜入射オートフォーカス系(AF1、AF2)を用いてウエハステージWSを光軸Axの方向に沿って所定量だけ移動させて当該異なるショット領域にテストマスクTR1の像を焼き付ける。この様に、ウエハステージWSの2次元的な移動、光軸方向でのウエハステージWSの移動、露光の動作を繰り返して、投影光学系PLの光軸方向に沿った複数の位置でのテストマスクTR1の焼き付けを行う。なお、ショット領域の数が1つのウエハに収まらない場合には、別のウエハをウエハステージWS上に載置する動作を挟んでも良い。

【0037】次に、実際にウエハW上に焼き付けられたパターンの各マーク像に基づいて、各マークの最良像の位置(露光領域内での位置および光軸方向での位置)を、電子顕微鏡等を用いて、焼き付けた全てのウエハに関して求めることにより、図9に示す如く、検査対象の投影光学系PLの像面弯曲量を検出することができる。ここで、図9は、横軸に像高、縦軸にディフォーカス量を取った時の像面弯曲を示しており、図9の曲線aは、ステップ3にて組み上がった投影光学系PLに残存する像面弯曲を示している。この曲線aは、図7に示すテストマスクTR1を用いて実際にウエハWを試し焼きして得られた結果、すなわち最良マーク像の位置をプロットしたものである。

【0038】また、歪曲収差の測定の場合には、図1に示す如き装置(または図1に示す構成を持つ検査機)に検査対象の投影光学系PLを取り付けると共に、図8に示すテストパターンをマスクステージRSに保持する。この時のテストマスクTR2は、XY平面内にて複数のマークが形成されたテストパターン領域PA2とその周辺に形成された遮光帯LSTとを有しており、そのテストパターン領域PA2には、例えば、十字上の直交型のマーク($M_{0,0} \sim M_{8,8}$)がX方向並びにY方向において等間隔となるように81か所に形成されている。その後、実際のテストパターンを検査対象の投影光学系PLを介して感光性基板としてのウエハ上に焼き付ける。このとき、ウエハ表面は投影光学系PLの最良像面に位置するように斜入射オートフォーカス系(AF1、AF

2)を用いてウエハステージWSの位置を設定する。そして、実際に焼き付けられたパターンの各マーク位置と焼き付けられるべき各マークの理想的な位置(設計値による各マーク位置)とのずれ量を電子顕微鏡等を用いて求めることにより、検査対象の投影光学系PLの歪曲収差量を検出することができる。

【0039】ここで、図10は、横軸に像高、縦軸にデフォーカス量を取った時の歪曲収差を示しており、図10の曲線aは、ステップ3にて組み上がった投影光学系PLに残存する像面湾曲を示している。この曲線bは、図7に示すテストマスクTR1を用いて実際にウエハWを試し焼きして得られた結果、即ち設計値に対する各マーク位置のずれ量を各像高についてプロットしたものである。

【0040】なお、以上では、諸収差を計測するために実際に露光を行った例を述べたが、投影面上のCCD等の撮像素子を配置して、その撮像素子と電気的に接続されたCRTモニター等の表示装置を介して、テストマスク(TR1、TR2)の各マーク像の様子から諸収差量を求めても良い。この収差計測工程において、図3に示す如く、計測された投影光学系PLに残存する諸収差に関する収差量に関する情報をコンソール等の入力系6を介してコンピュータ、計算機等の演算系7のメモリー部に記憶させる。

〔ステップ5〕ステップ5は、以下に説明するサブステップ5aとサブステップ5bとを含むものであり、これらのサブステップ5a、5bは、ステップ5の中で平行して行われる。

〔サブステップ5a〕サブステップ5aでは、ステップ4にて計測された投影光学系PLに残存する低次の収差を除去するために、投影光学系PLを調整する。

【0041】まず、投影光学系PLの調整に先立って、コンピュータ、計算機等の演算系7は、図3に示す如く、メモリー部内に記憶された各情報、即ちステップ2にて得られた各光学素子の面形状に関する情報およびステップ3の組み立て工程にて得られた各光学素子の光学面の間隔に関する情報等に基づいて、メモリー部内に予め記憶された光学基本データを修正して、実際に組上がった投影光学系PLの製造過程での光学データを再現する。その後、演算系7は、メモリー部内に記憶された情報としてステップ4にて得られた投影光学系PLに残存する諸収差に関する収差量に関する情報と、実際に組上がった投影光学系PLの製造過程での光学データとに基づいて、収差が補正し得る各光学素子の光学面の間隔(以下、光学面の間隔補正量と呼ぶ)を算出し、不図示のCRTモニター等の表示系8にて、各光学素子の光学面の間隔補正量等の情報を表示する。

【0042】次に、コンピュータ等の演算系7にて算出された各光学素子の光学面の間隔補正量に基づいて、図4または図5に示した検査対象となる投影光学系PL内

部のワッシャ(3A~3E、5A~5D)の交換により光学素子間の光軸方向での相対間隔を変化、あるいは光軸に対して光学素子を傾斜させる。また、鏡筒1の側面を貫通する雌螺子部を通して螺合するビスの先端が保持枠に当接するように構成し、そのビスをドライバー等の工具を介して移動させることにより、保持部材間を光軸と直交する方向へずらす。これらの調整手法を行うことにより投影光学系PLを調整がなされ、例えば、図9、図10の各曲線aに示す如き像面湾曲、歪曲収差等の低次の収差が除去される。

【0043】なお、投影光学系PLの調整に際しては、必要に応じて投影光学系PLの1部または全部を分解し、ワッシャ(3A~3E、5A~5D)、あるいは光学ユニットの交換を行って、再度、投影光学系PLを組み上げる。

〔サブステップ5b〕このサブステップ5bでは、以上の如きサブステップ5aの調整工程と平行して、投影光学系PLの各レンズ素子の光学面(レンズ面)の間隔に関する情報を求める。すなわち、投影光学系PLの調整工程時において、保持ユニットと共に鏡筒内に収納されるワッシャ(3A~3E、5A~5D)の厚さを加味しながら工具(マイクロメータ等)を用いて各レンズ素子の光学面(レンズ面)の間隔を計測する。そして、サブステップ5aの調整作業とサブステップ5bの計測作業とを交互に行いながら、サブステップ5aの調整工程が完了した時の投影光学系PLの最終的な各レンズ素子の光学面(レンズ面)の間隔を求める。

【0044】このように、図3に示す如く、調整工程中または調整完了時での投影光学系PLの各レンズ素子の光学面(レンズ面)間の間隔に関する計測した結果(各レンズ素子の光学面(レンズ面)の間隔に関する情報)をコンソール等の入力系6を介してコンピュータ、計算機等の演算系7のメモリー部に記憶させる。

〔ステップ6〕ステップ5において投影光学系PLにて残存する低次の収差が投影光学系PLの調整によって除去された後に、ステップ6においては、光学素子の製造誤差(例えば、所定の曲率半径を持つ球面レンズで構成されるレンズ素子が製造誤差により微小な凹凸を持つ微小非球面レンズで構成されること等)、またはステップ3の調整にて除去できない投影光学系の製造段階で生ずる組立て製造誤差等が起因して投影光学系PLに残存する高次の収差を測定する。

【0045】収差の測定は、ステップ4にて述べたのと同様であるため詳細な説明は省略するが、例えば、テストマスク(TR1、TR2)を用いて、検査対象の投影光学系PLを介して感光性基板としてのウエハ上に焼き付ける。実際にウエハW上に焼き付けられたパターンの各マーク像を、電子顕微鏡等を用いて、焼き付けた全てのウエハに関して検査することにより、検査対象の投影光学系PLの高次の各収差を検出する。例えば、図9、

図10の各曲線bに示す如き像面弯曲、歪曲収差等の高次の収差が計測される。

【0046】このステップ6の高次の収差計測工程において、図3に示す如く、計測された投影光学系PLに残存する高次の収差量に関する情報をコンソール等の入力系6を介してコンピュータ、計算機等の演算系7のメモリ部に記憶させる。

〔ステップ7〕ステップ6にて得られた残存する高次収差量を補正する微小非球面を前記複数の光学部材の少なくとも1つに形成するためには、投影光学系PLの各光学部材の面形状の情報と、調整完了段階での投影光学系PLの複数の光学部材間の最終的な光学面の間隔の情報と、投影光学系の光学基本設計データ等の光学設計に関する情報とに基づいて、ステップ5での調整完了時の投影光学系PLの製造光学データを再現することが必要である。

【0047】このため、ステップ7は、前述のステップ2にて得られた各光学部材の面形状の情報と、前述のステップ5にて得られた複数の光学部材間の光学面の間隔の情報と、投影光学系の光学設計情報に基づいて、ステップ6にて得られた残存する高次収差量を補正する微小非球面を前記複数の光学部材の少なくとも1つに形成するものである。

【0048】この時の本ステップ7は、ステップ6にて計測された検査対象の投影光学系PLの高次の各収差を補正し得る非球面の位置、非球面の形状、非球面の数を決定する第1のサブステップ、その第1のサブステップの後、非球面加工すべき光学素子を取り出し、レンズ研磨加工機を用いて非球面加工を行う第2のサブステップ、第2のサブステップの後に、非球面加工された光学素子を投影光学系PLに組み込み調整する第3のサブステップを有している。

〔第1のサブステップ〕まず、ステップ2にて計測された各レンズ素子のレンズ面の面形状の情報、ステップ6にて求められた調整完了した時の投影光学系PLの各レンズ素子の光学面（レンズ面）の間隔に関する情報、並びに投影光学系PLの光学設計情報に基づいて、ステップ7にて計測された検査対象の投影光学系PLの高次の各収差を補正し得る非球面を決定する。

【0049】例えば、コンピュータ等の演算系7は、ステップ6にて計測された検査対象の投影光学系PLの高次の各収差に関する情報を用いて、ステップ5の調整工程に先立って得られた投影光学系PLの製造光学データに関する情報（ステップ2にて得られた各光学素子の面形状に関する情報およびステップ3の組み立て工程にて得られた各光学素子の光学面の間隔に関する情報等）に基づいて、修正された投影光学系PLの組上げ時での光学データの情報を再修正して、ステップ5の調整工程完了後での投影光学系PLの製造過程での光学データを再現する。

【0050】なお、ステップ5の調整工程に先立って得られた投影光学系PLの製造光学データに関する情報を用いることなく、ステップ2にて計測された各レンズ素子のレンズ面の面形状の情報、ステップ3の組み立て工程にて得られた各光学素子の光学面の間隔に関する情報、ステップ5にて求められた調整完了した時の投影光学系PLの各レンズ素子の光学面（レンズ面）の間隔に関する情報とを新たに用いて、ステップ5の調整工程完了後での投影光学系PLの製造過程での光学データを再現しても良い。また、組み立て工程及び調整工程を経た時の投影光学系PLの各レンズ素子の光学面（レンズ面）の間隔又は間隔変化量に関する履歴をコンソール等の入力系を介してコンピュータ計算機等の演算系7のメモリ部に記憶させ、その履歴から調整完了した時の投影光学系PLの各レンズ素子の光学面（レンズ面）の間隔を求め、それを各レンズ素子のレンズ面の面形状の情報として用いても良い。

【0051】次に、以上の如き再現された調整完了時の製造光学データと、メモリ部内に記憶された情報としてステップ6にて得られた投影光学系PLに残存する高次の諸収差に関する収差量に関する情報とに基づき、コンピュータ等の演算系7は光線追跡を行って、投影光学系PLに残存する高次の各収差を補正できるような微小非球面の位置、形状、非球面の数を決定する。

〔第2のサブステップ〕さて、コンピュータ等の演算系7を用いた光線追跡により求められた微小非球面を投影光学系PLに形成するために、必要に応じて投影光学系PLの1部または全部を分解し、非球面加工を施すべき光学ユニットを取り出す。その後、光学ユニット内の光学素子の取り出した後に、光学素子の加工面に対して非球面加工をレンズ研磨加工機により行う。

【0052】図11は、レンズ研磨加工機の構成を示すものであり、コンピュータ等の演算系7を用いて算出された非球面加工データをレンズ研磨加工機の入力系31を介して制御部20へ入力する。図11に示す如く、被加工対象としてのレンズ素子（光学素子）10は、XY方向に移動可能な移動ステージ21上に載置されており、その端部が例えばピン21aに当接している。なお、図11では、レンズ面等の光学面の屈折力が非常に弱い屈折性のレンズを被加工対象とした例を示しているが、レンズ面等の光学面の屈折力が零の光透過性の平行平板を被加工対象とすることもできる。さらには、レンズ面等の光学面の屈折力が強い屈折性のレンズを被加工対象としても良いが、製造上を考慮すると、できるだけレンズ面等の光学面の屈折力が弱い光学部材を加工対象とすることが望ましい。

【0053】また、ステージ21をXY方向へ2次元的に移動させるために駆動部22は、制御部20によって制御されている。駆動部22を介してステージ21を移動させる際に、ステージ21のXY方向の位置を検出す

るために、エンコーダ、干渉計等からなる位置検出部 30 がステージ 21 の左端側に設けられており、この位置検出部 30 から検出信号は制御部 20 へ伝達される。

【0054】また、研磨皿 23 は、保持部 24 を介して回転軸 25 の一端に取り付けられており、図中の Z 方向を軸として回転可能である。この回転軸 25 の他端には、制御部 20 によって制御されるモータ 26 が取り付けられている。回転軸 25 を回転自在に支持する軸受 27 は、不図示の本体に固設されている支持部 28 に対して Z 方向へ移動可能に設けられている。この支持部 28 には、制御部 20 により制御されるモータ 29 が取り付けられており、このモータ 29 の作用により軸受け 27 が Z 方向に沿って移動し、ひいては研磨皿 23 が Z 方向へ移動する。なお、研磨皿 23 を保持する保持部 24 には、研磨皿 23 と被加工物としてのレンズ素子 10 との接触圧を検出するためのセンサ（不図示）が設けられており、このセンサからの接触圧に関する出力は制御部 29 へ伝達される。

【0055】ステップ 5 におけるレンズ研磨加工機の動作について説明すると、まず、上述した如く、投影光学系 PL の高次の各収差を補正し得る光学素子に関する微小非球面の加工量、即ちコンピュータ等の計算系 7 を用いて算出された非球面加工データをレンズ研磨加工機の入力系 31 を介して制御部 20 へ入力すると共に、被加工物としての光学素子 10 を図 11 中のレンズ研磨加工機のステージ 21 上に保持する。

【0056】次に、制御部 20 は、モータ 26 を介して研磨皿 23 を回転させつつ駆動部 22 を介してステージ 21 の XY 方向に沿って移動させる。すなわち、研磨皿 23 は、被加工物としての光学素子 10 の加工面 10a に沿ってなぞるように移動する。このとき、加工面 10a における研磨量は、加工面 10a と研磨皿 23 との接触圧、及び研磨皿 23 の滞留時間で決定される。

〔第 3 のサブステップ〕以上のレンズ研磨加工機による加工が完了すると、被加工物としての光学素子 10 は、蒸着工程等により反射防止膜が施された後、保持枠が取り付けられる。そして、最終的に、レンズ研磨加工機により非球面加工された光学素子を保持する光学ユニットを投影光学系 PL に組み込む。このとき、必要に応じて図 4 または図 5 に示した検査対象となる投影光学系 PL 内部のワッシャ（4A～4E、5A～5D）の交換により光学素子間の光軸方向での相対間隔を微調整、あるいは光軸に対して光学素子を傾斜させたり、また保持部材間を光軸と直交する方向へずらす。これらの調整手法を行うことにより投影光学系 PL を調整がなされ、例えば、図 9、図 10 に示す如き像面湾曲、歪曲収差等の高次の収差が除去され、所望の結像性能を持つ投影光学系 PL の製造が達成される。

【0057】

【実施例】次に、以上の各ステップにより製造される投

影光学系 PL に関して具体的に説明する。図 12 には、照明光学装置 IS 内部に配置される光源として、248.4nm の露光波長 λ を持つ光を供給するエキシマレーザとしたときの投影光学系のレンズ構成の例を示している。

【0058】図 12 に示す如く、本例での投影光学系は、第 1 物体としてのレチクル R 側より順に、正の屈折力を持つ第 1 レンズ群 G₁ と、負の屈折力を持つ第 2 レンズ群 G₂ と、正の屈折力を持つ第 3 レンズ群 G₃ と、負の屈折力を持つ第 4 レンズ群 G₄ と、正の屈折力を持つ第 5 レンズ群 G₅ と、正の屈折力を持つ第 6 レンズ群 G₆ とを有している。

【0059】まず、正の屈折力を持つ第 1 レンズ群はテレセントリック性を維持しながら主にディストーションの補正に寄与しており、具体的には、第 1 レンズ群にて正のディストーションを発生させて、この第 1 レンズ群よりも第 2 物体側に位置する複数のレンズ群にて発生する負のディストーションをバランス良く補正している。負の屈折力を持つ第 2 レンズ群及び負の屈折力を持つ第 4 レンズ群は、主にベッツバル和の補正に寄与し、像面の平坦化を図っている。負の屈折力を持つ第 2 レンズ群及び正の屈折力を持つ第 3 レンズ群では、この 2 つのレンズ群において逆望遠系を形成しており、投影光学系のバックフォーカス（投影光学系の最も第 2 物体側のレンズ面等の光学面から第 2 物体までの距離）の確保に寄与している。正の屈折力を持つ第 5 レンズ群及び同じく正の屈折力を持つ第 6 レンズ群は、ディストーションの発生を抑えることと、第 2 物体側での高 NA 化に十分対応するために特に球面収差の発生を極力抑えることとに主に寄与している。

【0060】このとき、第 1 レンズ群の焦点距離を f_1 とし、第 2 レンズ群の焦点距離を f_2 、第 3 レンズ群の焦点距離を f_3 、第 4 レンズ群の焦点距離を f_4 、第 5 レンズ群の焦点距離を f_5 、第 6 レンズ群の焦点距離を f_6 、第 1 物体面から第 2 物体面までの距離を L とするとき、以下の条件（8）～（11）を満足することがより望ましい。

$$(8) \quad 0.1 < f_1 / f_3 < 1.7$$

$$(9) \quad 0.1 < f_2 / f_4 < 1.4$$

$$(10) \quad 0.01 < f_5 / L < 0.9$$

$$(11) \quad 0.02 < f_6 / L < 1.6$$

条件（8）では、正の屈折力の第 1 レンズ群の焦点距離 f_1 と正の屈折力の第 3 レンズ群の焦点距離 f_3 との最適な比率、即ち、第 1 レンズ群と第 3 レンズ群との最適な屈折力（パワー）配分を規定している。この条件

（8）は、主にディストーションをバランス良く補正するためのものであり、この条件（8）の下限を越えると、第 3 レンズ群の屈折力が第 1 レンズ群の屈折力に対して相対的に弱くなるため、負のディストーションが大きく発生する。また、条件（8）の上限を越えると、第 1 レンズ群の屈折力が第 3 レンズ群の屈折力に対して相

対的に弱くなるため、負のディストーションが大きく発生する。

【0061】条件（9）では、負の屈折力の第2レンズ群の焦点距離 f_2 と負の屈折力の第4レンズ群の焦点距離 f_4 との最適な比率、即ち、第2レンズ群と第4レンズ群との最適な屈折力（パワー）配分を規定している。この条件（9）は、主にベッツバール和を小さくして、広い露光フィールドを確保しながら、像面湾曲を良好に補正するためのものであり、この条件（9）の下限を越えると、第4レンズ群の屈折力が第2レンズ群の屈折力に対して相対的に弱くなるため、正のベッツバール和が大きく発生する。また、条件（9）の上限を越えると、第2レンズ群の屈折力が第4レンズ群の屈折力に対して相対的に弱くなるため、正のベッツバール和が大きく発生する。なお、第4レンズ群の屈折力を第2レンズ群の屈折力に対して相対的に強くして、広い露光フィールドのもとでベッツバール和をよりバランス良く補正するためには、上記条件（9）の下限値を0.8として、 $0.8 < f_2 / f_4$ とすることが好ましい。

【0062】条件（10）では、正の屈折力の第5レンズ群の焦点距離 f_5 と第1物体（レチクル等）と第2物体（ウェハ等）までの距離（物像間距離） L との最適な比率を規定している。この条件（10）は、大きな開口数を保ちながら球面収差、ディストーション及びベッツバール和をバランス良く補正するためのものである。この条件（10）の下限を越えると、第5レンズ群の屈折力が大きくなり過ぎ、この第5レンズ群にて負のディストーションのみならず負の球面収差が甚大に発生する。この条件（10）の上限を越えると、第5レンズ群の屈折力が弱くなり過ぎ、これに伴って負の屈折力の第4レンズ群の屈折力も必然的に弱くなり、この結果、ベッツバール和を良好に補正することができない。

【0063】条件（11）では、正の屈折力の第6レンズ群の焦点距離 f_6 と、第1物体（レチクル等）から第2物体（ウェハ等）までの距離（物像間距離） L との最適な比率を規定している。この条件（11）は、大きな開口数を保ちながら高次の球面収差及び負のディストーションの発生を抑えるためのものである。この条件（11）の下限を越えると、第6レンズ群自身にて負のディストーションが大きく発生し、この条件（11）の上限を越えると、高次の球面収差が発生する。

【0064】さて、図11に示した本例の投影光学系PLに関する諸元の値を以下の表1に掲げ、また表1に示す投影光学系PLに関する上記条件（8）～（11）の条件対応値を表2に掲げる。但し、左端の数字は物体側（レチクル側）からの順序を表し、 r はレンズ面の曲率半径、 d はレンズ面間隔、 n は露光波長 λ が248.4nmにおける合成石英SiO₂の屈折率、 d_0 は第1物体（レチクル）から第1レンズ群G1の最も物体側（レチクル側）のレンズ面（第1レンズ面）までの距離、 Bf は第

6レンズ群G6の最も像側（ウェハ側）のレンズ面から像面（ウェハ面）までの距離、 B は投影光学系の投影倍率、 NA は投影光学系の像側での開口数、 L は物体面（レチクル面）から像面（ウェハ面）までの物像間距離、 f_1 は第1レンズ群G1の焦点距離、 f_2 は第2レンズ群G2の焦点距離、 f_3 は第3レンズ群G3の焦点距離、 f_4 は第4レンズ群G4の焦点距離、 f_5 は第5レンズ群G5の焦点距離、 f_6 は第6レンズ群G6の焦点距離を表している。

【0065】

【表1】

$$d0 = 105.99385$$

$$B = 1/5$$

$$NA = 0.55$$

$$Bf = 28.96856$$

$$L = 1200$$

	r	d	n
1	723.32335	28.00000	1.50839 (L ₁₁)
2	-571.27029	2.00000	
3	-8470.94995	20.00000	1.50839 (L ₁₂)
4	324.13159	7.92536	
5	360.44110	28.00000	1.50839 (L ₁₃)
6	-432.97069	1.04750	
7	397.04484	27.00000	1.50839 (L ₁₄)
8	-825.96923	0.97572	
9	214.74004	31.00000	1.50839 (L ₂₁)
10	110.51892	24.04713	
11	229.41181	26.00000	1.50839 (L ₂₂)
12	-396.52854	1.10686	
13	-1014.34000	17.00000	1.50839 (L ₃₁)
14	137.90605	18.76700	
15	-418.55207	12.90000	1.50839 (L ₃₂)
16	138.89479	26.88549	
17	-133.71351	15.00000	1.50839 (L ₃₃)
18	561.35918	52.53782	
19	1381.31000	35.00000	1.50839 (L ₄₁)
20	-188.69074	14.91509	
21	-134.03345	22.80000	1.50839 (L ₄₂)
22	-198.69180	2.79782	
23	-3029.37000	27.00000	1.50839 (L ₅₁)
24	-333.96362	2.87255	
25	905.53484	28.00000	1.50839 (L ₅₂)
26	-611.80005	2.49780	
27	254.70879	30.00000	1.50839 (L ₅₃)
28	3936.53000	1.64701	
29	239.51669	31.00000	1.50839 (L ₅₄)
30	-1238.94000	5.60527	
31	-2379.42001	21.00000	1.50839 (L ₅₅)
32	150.43068	9.76890	
33	209.21387	17.00000	1.50839 (L ₅₆)
34	149.67785	31.54706	
35	-199.55198	15.90000	1.50839 (L ₅₇)
36	341.76300	57.70880	
37	-170.75300	18.00000	1.50839 (L ₅₈)
38	-3700.60999	6.28784	
39	-1025.75000	23.00000	1.50839 (L ₅₉)

40	-212.37919	1.14438	
41	-3009.97000	23.00000	1.50839 (L ₆₁)
42	-312.33647	2.92283	
43	401.05778	37.00000	1.50839 (L ₆₂)
44	-361.42967	12.43498	
45	-231.63315	27.00000	1.50839 (L ₆₃)
46	-319.48896	1.10071	
47	355.64919	25.00000	1.50839 (L ₆₄)
48	3678.53000	4.83032	
49	177.43364	32.00000	1.50839 (L ₆₅)
50	553.83964	3.29194	
51	137.68248	39.90000	1.50839 (L ₆₆)
52	330.86342	9.82671	
53	587.42747	23.00000	1.50839 (L ₆₇)
54	81.23164	7.04896	
55	93.74477	71.00000	1.50839 (L ₆₈)
56	1555.42999		

【0066】

【表2】

〔条件(8)～条件(11)に関する条件対応値〕

$$f_1 / f_3 = 1.58$$

$$f_2 / f_4 = 1.63$$

$$f_5 / L = 0.0923$$

$$f_6 / L = 0.161$$

図12に示す如く、表1の投影光学系は、第1物体としてのレチクルR側より順に、正の屈折力を持つ第1レンズ群G₁と、負の屈折力を持つ第2レンズ群G₂と、正の屈折力を持つ第3レンズ群G₃と、負の屈折力を持つ第4レンズ群G₄と、正の屈折力を持つ第5レンズ群G₅と、正の屈折力を第6レンズ群G₆とを有し、物体側（レチクルR側）及び像側（ウェハW側）においてほぼテレセントリックとなっており、縮小倍率を有するものである。なお、図12に示す各実施例の投影光学系は、それぞれ物像間距離（物体面から像面までの距離、またはレチクルRからウェハWまでの距離）Lが1200、像側の開口数NAが0.55、投影倍率Bが1/5、ウェハW上での露光領域の直径が31.2である。

【0067】図12に示した投影光学系の具体的なレンズ構成を説明すると、まず、第1レンズ群G₁は、物体側から順に、像側に凸面を向けた形状の正レンズ（両凸形状のレンズ）L₁₁と、物体側に凸面を向けたメニスカス形状の負レンズL₁₂と、両凸形状の2枚の正レンズ（L₁₃、L₁₄）とを有している。そして、第2レンズ群G₂は、最も物体側に配置されてその像側に凹面を向けた負メニスカスレンズ（前方レンズ）L₂₁と、最も像側に配置されて物体側に凹面を向けた負メニスカスレンズ（後方レンズ）L₂₂と、第2レンズ群G₂内の最も物体側に位置する負メニスカスレンズL₂₃と第2レンズ群内の最も像側に位置する負メニスカスレンズL₂₄との間に配置されて負の屈折力を持つ中間レンズ群G_{2M}とから構成

されている。

【0068】その中間レンズ群 G_{2M} は、物体側から順に、両凸形状の正レンズ（第1レンズ） L_{M1} と、像側により強い曲率の面を向けた負レンズ（第2レンズ） L_{M2} と、両凹形状の負レンズ（第3レンズ） L_{M3} 、物体側により強い曲率の面を向けた負レンズ（第4レンズ） L_{M4} 、像側により強い曲率の面を向けた正レンズ（第5レンズ） L_{M5} から構成されている。

【0069】また、第3レンズ群 G_3 は、像側により強い曲率の面を向けた正レンズ（正メニスカスレンズ） L_{31} と、両凸形状の正レンズ L_{32} と、物体側に凸面を向けた正レンズ（正メニスカスレンズ） L_{33} と、物体側により強い曲率の面を向けた正レンズ L_{34} とから構成されており、第4レンズ群 G_4 は、像側に凹面を向けた負レンズ L_{41} と、像側に凹面を向けた負メニスカスレンズ L_{42} と、両凹形状の負レンズ L_{43} と、物体側に凹面を向けた負レンズ L_{44} とから構成されている。

【0070】ここで、第4レンズ群 G_4 中の負レンズ L_{41} の像側の凹面と、負メニスカスレンズ L_{44} の物体側の凹面との間の光路中には、開口絞りASが配置される。第5レンズ群 G_5 は、像側に凸面を向けた正メニスカスレンズ L_{51} と、像側により強い曲率の面を向けた正レンズ L_{52} と、両凸形状の正レンズ L_{53} と、物体側に凹面を向けた負メニスカスレンズ L_{54} と、物体側により強い曲率の面を向けた正レンズ L_{55} と、物体側に凸面を向けた正メニスカスレンズ L_{56} と、物体側により強い曲率の面を向けた正レンズ（正メニスカスレンズ） L_{57} と、像側に凹面を向けた負レンズ（負メニスカスレンズ） L_{58} とから構成され、第6レンズ群 G_6 は、物体側に凸面を向けた厚肉の正レンズ L_{61} のみから構成される。

【0071】ここで、第1レンズ群 G_1 においては、物体側に凸面を向けたメニスカス形状の負レンズ L_{12} の像側のレンズ面と、両凸形状の正レンズ L_{13} の物体側のレンズ面とが同程度の曲率を有しかつ比較的近接しているため、これらの2つのレンズ面が高次のディストーションを補正している。また、第2レンズ群 G_2 の最も物体側に配置される負の屈折力を持つ前方レンズ L_{2F} が像側に凹面を向けたメニスカス形状で構成されているため、コマ収差の発生を軽減することができ、中間レンズ群 G_{2M} の正の屈折力を持つ第1レンズ L_{M1} が像側に凸面を向けた形状のみならず物体側にも凸面を向けた両凸形状で構成されているため、瞳の球面収差の発生を抑えることができる。また、中間レンズ群 G_{2M} の正の屈折力を持つ第5レンズ L_{M5} が、その像側に配置される負の屈折力を持つ後方レンズ L_{2R} の凹面と対向する凸面を有するため、非点収差を補正することができる。

【0072】また、第4レンズ群 G_4 では、負レンズ（両凹形状の負レンズ） L_{43} の物体側に凹面を像側に向けた負レンズ L_{41} を配置し、負レンズ（両凹形状の負レンズ） L_{43} の像側に凹面を物体側に向けた負レンズ L_{44} を

配置する構成であるため、コマ収差の発生を抑えつつベッツバル和を補正することができる。また、第4レンズ群 G_4 中の負レンズ L_{41} の像側の凹面と負レンズ L_{44} の物体側の凹面との間に開口絞りASを配置することによって、第3レンズ群 G_3 から第6レンズ群 G_6 までのレンズ群を開口絞りASを中心にして、多少縮小倍率を掛けつつ対称性をあまり崩さずに構成できるため、非対称収差、特にコマ収差やディストーションの発生を抑制することができる。

【0073】また、第5レンズ群 G_5 中の正レンズ L_{53} が、負メニスカスレンズ L_{54} に対向する凸面を有し、かつ負メニスカスレンズ L_{54} と反対側のレンズ面も凸面である両凸形状であるため、高NA化に伴う高次の球面収差の発生を良好に抑えることができる。さて、次に、表1に示す基本設計データに基づく投影光学系PLを製造する工程についての実施例を説明する。

〔ステップ1〕図2に示した如く、前述のステップ1にて、表1に示すレンズデータを満たす投影光学系PLを構成する各レンズ並びに各レンズを保持する保持枠、レンズと保持枠とからなる保持ユニットを収納する鏡筒を製造する。すなわち、各レンズは、周知のレンズ加工機を用いて所定の光学材料（石英）からそれぞれ所定の曲率半径、所定の軸上厚を持つように加工され、また各レンズを保持する保持枠、レンズと保持枠とからなる保持ユニットを収納する鏡筒は、周知の金属加工機等を用いて所定の保持材料（ステンレス、真鍮、セラミック等）からそれぞれ所定の寸法を持つ形状に加工される。

〔ステップ2〕次に、ステップ2では、球面に加工されるべきレンズ面がレンズ面の加工誤差等により微小非球面化しているか否かについて正確なレンズ面の加工情報を得るために、ステップ1にて加工された全てのレンズのレンズ面に関して、図6に示す如きフィゾー型の干渉計を用いて各レンズのレンズ面の形状が計測される。その計測結果は、図3に示した如く、コンピュータ、計算機等の演算系7内のメモリ部にコンソール等の入力系6を介して記憶される。なお、フィゾー型の干渉計の内部に設けられた面形状算出部と演算系7とを電氣的に接続し、面形状算出部からの出力結果を演算系7のメモリ一部に入力する構成としても良い。

【0074】ここで、計測されたレンズ面の形状のデータに関する一例を表3に示す。表3に示す如く、 $r1 \sim r3$ 、 $r5$ 、 $r6$ 、 $r9 \sim r15$ 、 $r17$ 、 $r19$ 、 $r21 \sim r23$ 、 $r31$ 、 $r34$ 、 $r35$ 、 $r37$ 、 $r45 \sim r47$ 、 $r49 \sim r52$ および $r54$ の29面のレンズ面は、球面レンズ面とはなっておらず、加工誤差によって非球面となっている。なお、表3に示していない $r4$ 、 $r7$ 、 $r8$ 、 $r16$ 、 $r18$ 、 $r20$ 、 $r24$ 、 $r25$ 、 $r26 \sim r30$ 、 $r32$ 、 $r33$ 、 $r36$ 、 $r38 \sim r44$ 、 $r53 \sim r56$ の27面のレンズ面は表1に示す設計値どおり球面でレンズ面が加工されている。

【0075】なお、表3において、計測されたレンズ面

の非球面形状は、光軸からの高さを h とし、光軸からの高さ h における非球面上の点からレンズ頂点での接平面までの光軸に沿った距離を $X(h)$ 、近軸の曲率半径を r 、円錐定数を k 、自然数を i 、 $2i$ 次の非球面係数を C_{2i} とすると、前述の(7)式のように表現している。

$$X(h) = A / [1 + (1 - kA/r)^{0.5}] + C_2 h^2 + C_4 h^4 + \dots + C_{2i} h^{2i}$$

但し、 $A = h^2 / r$ である。

【0076】なお、この非球面式(または(7)式)を上述の(8)式で表現した場合には、奇数次の非球面係数(C_1 、 C_3 、 C_5 、 C_7 、 C_9 、 C_{11} 、 C_{13} 、 C_{15})を全て零とした場合となる。

【0077】

【表3】

r 1 (レンズL₁₁の物体側面)

$k = 1$

$$C_2 = -5.471 \times 10^{-9}, C_4 = 7.211 \times 10^{-12}$$

$$C_6 = -6.987 \times 10^{-15}, C_8 = 3.581 \times 10^{-18}$$

$$C_{10} = -9.940 \times 10^{-22}, C_{12} = 1.515 \times 10^{-25}$$

$$C_{14} = -1.189 \times 10^{-29}, C_{16} = 3.746 \times 10^{-34}$$

r 2 (レンズL₁₁の像側面)

$k = 1$

$$C_2 = 9.640 \times 10^{-9}, C_4 = -1.559 \times 10^{-11}$$

$$C_6 = 7.989 \times 10^{-15}, C_8 = -1.994 \times 10^{-18}$$

$$C_{10} = 2.676 \times 10^{-22}, C_{12} = -1.970 \times 10^{-26}$$

$$C_{14} = 7.842 \times 10^{-31}, C_{16} = -1.486 \times 10^{-35}$$

r 3 (レンズL₁₂の物体側面)

$k = 1$

$$C_2 = 2.504 \times 10^{-9}, C_4 = 1.800 \times 10^{-12}$$

$$C_6 = -1.945 \times 10^{-15}, C_8 = 7.684 \times 10^{-19}$$

$$C_{10} = -1.617 \times 10^{-22}, C_{12} = 1.883 \times 10^{-26}$$

$$C_{14} = -1.140 \times 10^{-30}, C_{16} = 2.796 \times 10^{-35}$$

r 5 (レンズL₁₃の物体側面)

$k = 1$

$$C_2 = -9.776 \times 10^{-9}, C_4 = 1.584 \times 10^{-11}$$

$$C_6 = -7.836 \times 10^{-15}, C_8 = 1.971 \times 10^{-18}$$

$$C_{10} = -2.706 \times 10^{-22}, C_{12} = 1.945 \times 10^{-26}$$

$$C_{14} = -6.176 \times 10^{-31}, C_{16} = 3.939 \times 10^{-36}$$

r 6 (レンズL₁₃の像側面)

$k = 1$

$$C_2 = -1.281 \times 10^{-8}, C_4 = 6.967 \times 10^{-12}$$

$$C_6 = -1.619 \times 10^{-15}, C_8 = 2.539 \times 10^{-19}$$

$$C_{10} = -4.180 \times 10^{-23}, C_{12} = 5.733 \times 10^{-27}$$

$$C_{14} = -4.365 \times 10^{-31}, C_{16} = 1.315 \times 10^{-35}$$

r 9 (レンズL_{2F}の物体側面)

$k = 1$

$$C_2 = -8.091 \times 10^{-9}, C_4 = 1.051 \times 10^{-11}$$

$$C_6 = -1.073 \times 10^{-14}, C_8 = 5.072 \times 10^{-18}$$

$$C_{10} = -1.232 \times 10^{-21}, C_{12} = 1.619 \times 10^{-25}$$

$$C_{14} = -1.097 \times 10^{-29}, C_{16} = 3.005 \times 10^{-34}$$

r 10 (レンズL_{2F}の像側面)

$k = 1$

$$C_2 = 1.208 \times 10^{-8}, C_4 = -3.713 \times 10^{-12}$$

$$C_6 = 1.231 \times 10^{-15}, C_8 = -3.068 \times 10^{-18}$$

$$C_{10} = 2.347 \times 10^{-21}, C_{12} = -7.694 \times 10^{-25}$$

$$C_{14} = 1.169 \times 10^{-28}, C_{16} = -6.760 \times 10^{-33}$$

r 1 1 (レンズL_{M1}の物体側面)

k = 1

$$C_2 = -3.296 \times 10^{-8} \text{、} C_4 = 6.279 \times 10^{-11}$$

$$C_6 = -5.572 \times 10^{-14} \text{、} C_8 = 3.563 \times 10^{-17}$$

$$C_{10} = -1.492 \times 10^{-20} \text{、} C_{12} = 3.643 \times 10^{-24}$$

$$C_{14} = -4.659 \times 10^{-28} \text{、} C_{16} = 2.397 \times 10^{-32}$$

r 1 2 (レンズL_{M1}の像側面)

k = 1

$$C_2 = 2.002 \times 10^{-8} \text{、} C_4 = -3.252 \times 10^{-11}$$

$$C_6 = 2.300 \times 10^{-14} \text{、} C_8 = -2.545 \times 10^{-18}$$

$$C_{10} = -6.506 \times 10^{-21} \text{、} C_{12} = 3.926 \times 10^{-24}$$

$$C_{14} = -8.762 \times 10^{-28} \text{、} C_{16} = 6.968 \times 10^{-32}$$

r 1 3 (レンズL_{M2}の物体側面)

k = 1

$$C_2 = 5.766 \times 10^{-9} \text{、} C_4 = -4.636 \times 10^{-11}$$

$$C_6 = 6.549 \times 10^{-14} \text{、} C_8 = -4.629 \times 10^{-17}$$

$$C_{14} = 5.396 \times 10^{-28} \text{、} C_{16} = -2.777 \times 10^{-32}$$

r 1 4 (レンズL_{M2}の像側面)

k = 1

$$C_2 = 4.539 \times 10^{-8} \text{、} C_4 = -7.979 \times 10^{-11}$$

$$C_6 = 7.887 \times 10^{-14} \text{、} C_8 = -5.989 \times 10^{-17}$$

$$C_{10} = 4.596 \times 10^{-20} \text{、} C_{12} = -2.583 \times 10^{-23}$$

$$C_{14} = 7.533 \times 10^{-27} \text{、} C_{16} = -8.407 \times 10^{-31}$$

r 1 5 (レンズL_{M3}の物体側面)

k = 1

$$C_2 = -3.853 \times 10^{-8} \text{、} C_4 = 6.880 \times 10^{-11}$$

$$C_6 = -9.409 \times 10^{-14} \text{、} C_8 = 8.629 \times 10^{-17}$$

$$C_{10} = -5.002 \times 10^{-20} \text{、} C_{12} = 1.716 \times 10^{-23}$$

$$C_{14} = -3.068 \times 10^{-27} \text{、} C_{16} = 2.139 \times 10^{-31}$$

r 1 7 (レンズL_{M4}の物体側面)

k = 1

$$C_2 = -3.484 \times 10^{-8} \text{、} C_4 = 4.891 \times 10^{-11}$$

$$C_6 = -6.547 \times 10^{-14} \text{、} C_8 = 5.864 \times 10^{-17}$$

$$C_{10} = -3.072 \times 10^{-20} \text{、} C_{12} = 8.969 \times 10^{-24}$$

$$C_{14} = -1.308 \times 10^{-27} \text{、} C_{16} = 7.039 \times 10^{-32}$$

r 1 9 (レンズL_{M5}の物体側面)

k = 1

$$C_2 = 9.291 \times 10^{-9} \text{、} C_4 = 1.762 \times 10^{-12}$$

$$C_6 = -5.641 \times 10^{-15} \text{、} C_8 = 3.610 \times 10^{-18}$$

$$C_{10} = -1.147 \times 10^{-21} \text{、} C_{12} = 1.958 \times 10^{-25}$$

$$C_{14} = -1.716 \times 10^{-29} \text{、} C_{16} = 6.070 \times 10^{-34}$$

r 2 1 (レンズL_{2R}の物体側面)

k = 1

$$C_2 = -1.793 \times 10^{-9} \text{、} C_4 = 8.806 \times 10^{-12}$$

$$C_6 = -1.134 \times 10^{-14} \text{、} C_8 = 6.366 \times 10^{-18}$$

$$C_{10} = -1.936 \times 10^{-21} \text{、} C_{12} = 3.284 \times 10^{-25}$$

$$C_{14} = -2.890 \times 10^{-29} \text{、} C_{16} = 1.022 \times 10^{-33}$$

r 2 2 (レンズL_{2R}の像側面)

k = 1

$$C_2 = 2.095 \times 10^{-8} \text{、} C_4 = -2.339 \times 10^{-11}$$

$$C_6 = 1.406 \times 10^{-14}, C_8 = -4.552 \times 10^{-18}$$

$$C_{10} = 8.283 \times 10^{-22}, C_{12} = -8.499 \times 10^{-26}$$

$$C_{14} = 4.593 \times 10^{-30}, C_{16} = -1.017 \times 10^{-34}$$

r 2 3 (レンズL₃₁の物体側面)

k = 1

$$C_2 = -3.700 \times 10^{-9}, C_4 = 1.870 \times 10^{-12}$$

$$C_6 = -5.376 \times 10^{-16}, C_8 = 3.559 \times 10^{-20}$$

$$C_{10} = 1.000 \times 10^{-23}, C_{12} = -2.129 \times 10^{-27}$$

$$C_{14} = 1.566 \times 10^{-31}, C_{16} = -4.112 \times 10^{-36}$$

r 3 1 (レンズL₄₁の物体側面)

k = 1

$$C_2 = -1.652 \times 10^{-8}, C_4 = 2.774 \times 10^{-12}$$

$$C_6 = 4.818 \times 10^{-15}, C_8 = -3.252 \times 10^{-18}$$

$$C_{10} = 9.372 \times 10^{-22}, C_{12} = -1.430 \times 10^{-25}$$

$$C_{14} = 1.124 \times 10^{-29}, C_{16} = -3.585 \times 10^{-34}$$

r 3 4 (レンズL₄₂の像側面)

k = 1

$$C_2 = -1.756 \times 10^{-8}, C_4 = 1.631 \times 10^{-11}$$

$$C_6 = -7.091 \times 10^{-15}, C_8 = 1.179 \times 10^{-19}$$

$$C_{10} = 1.068 \times 10^{-21}, C_{12} = -3.875 \times 10^{-25}$$

$$C_{14} = 5.632 \times 10^{-29}, C_{16} = -3.048 \times 10^{-33}$$

r 3 5 (レンズL₄₃の物体側面)

k = 1

$$C_2 = -3.427 \times 10^{-8}, C_4 = 5.336 \times 10^{-11}$$

$$C_6 = -3.932 \times 10^{-14}, C_8 = 1.308 \times 10^{-17}$$

$$C_{10} = -1.146 \times 10^{-21}, C_{12} = -4.070 \times 10^{-25}$$

$$C_{14} = 1.117 \times 10^{-28}, C_{16} = -8.291 \times 10^{-33}$$

r 3 7 (レンズL₄₄の物体側面)

k = 1

$$C_2 = 4.750 \times 10^{-8}, C_4 = -2.692 \times 10^{-12}$$

$$C_6 = -1.583 \times 10^{-14}, C_8 = 2.256 \times 10^{-17}$$

$$C_{10} = -1.298 \times 10^{-20}, C_{12} = 3.758 \times 10^{-24}$$

$$C_{14} = -5.379 \times 10^{-28}, C_{16} = 3.020 \times 10^{-32}$$

r 4 5 (レンズL₅₄の物体側面)

k = 1

$$C_2 = -1.581 \times 10^{-9}, C_4 = -7.300 \times 10^{-12}$$

$$C_6 = 3.438 \times 10^{-15}, C_8 = -6.407 \times 10^{-19}$$

$$C_{10} = 4.045 \times 10^{-23}, C_{12} = 2.557 \times 10^{-27}$$

$$C_{14} = -4.391 \times 10^{-31}, C_{16} = 1.501 \times 10^{-35}$$

r 4 6 (レンズL₅₄の像側面)

k = 1

$$C_2 = -2.319 \times 10^{-8}, C_4 = 2.142 \times 10^{-11}$$

$$C_6 = -9.743 \times 10^{-15}, C_8 = 2.355 \times 10^{-18}$$

$$C_{10} = -3.234 \times 10^{-22}, C_{12} = 2.546 \times 10^{-27}$$

$$C_{14} = -1.073 \times 10^{-30}, C_{16} = 1.877 \times 10^{-35}$$

r 4 7 (レンズL₅₅の物体側面)

k = 1

$$C_2 = 7.534 \times 10^{-9}, C_4 = -1.324 \times 10^{-12}$$

$$C_6 = 1.738 \times 10^{-16}, C_8 = 1.051 \times 10^{-19}$$

$$C_{10} = -4.377 \times 10^{-23}, C_{12} = 6.217 \times 10^{-27}$$

$$C_{14} = -3.932 \times 10^{-31}, C_{16} = 9.384 \times 10^{-36}$$

r 4 9 (レンズL₅₆の物体側面)

$$k = 1$$

$$C_2 = -8.499 \times 10^{-9}, C_4 = 4.471 \times 10^{-12}$$

$$C_6 = -2.412 \times 10^{-15}, C_8 = 1.080 \times 10^{-18}$$

$$C_{10} = -2.747 \times 10^{-22}, C_{12} = 3.709 \times 10^{-26}$$

$$C_{14} = -2.503 \times 10^{-30}, C_{16} = 6.654 \times 10^{-35}$$

r 5 0 (レンズL₅₆の像側面)

$$k = 1$$

$$C_2 = -8.992 \times 10^{-11}, C_4 = 4.380 \times 10^{-12}$$

$$C_6 = -3.536 \times 10^{-15}, C_8 = 1.459 \times 10^{-18}$$

$$C_{10} = -3.388 \times 10^{-22}, C_{12} = 4.466 \times 10^{-26}$$

$$C_{14} = -3.120 \times 10^{-30}, C_{16} = 8.912 \times 10^{-35}$$

r 5 1 (レンズL₅₇の物体側面)

$$k = 1$$

$$C_2 = -2.893 \times 10^{-8}, C_4 = -1.291 \times 10^{-14}$$

$$C_6 = 1.271 \times 10^{-14}, C_8 = -7.075 \times 10^{-18}$$

$$C_{10} = 1.863 \times 10^{-21}, C_{12} = -2.673 \times 10^{-25}$$

$$C_{14} = 2.008 \times 10^{-29}, C_{16} = -6.190 \times 10^{-34}$$

r 5 2 (レンズL₅₇の像側面)

$$k = 1$$

$$C_2 = 1.227 \times 10^{-8}, C_4 = -1.288 \times 10^{-11}$$

$$C_6 = 1.178 \times 10^{-14}, C_8 = -5.922 \times 10^{-18}$$

$$C_{10} = 1.623 \times 10^{-21}, C_{12} = -2.449 \times 10^{-25}$$

$$C_{14} = 1.915 \times 10^{-29}, C_{16} = -6.065 \times 10^{-34}$$

r 5 4 (レンズL₅₈の像側面)

$$k = 1$$

$$C_2 = 4.194 \times 10^{-8}, C_4 = -1.060 \times 10^{-10}$$

$$C_6 = 2.183 \times 10^{-13}, C_8 = -2.482 \times 10^{-16}$$

$$C_{10} = 1.558 \times 10^{-19}, C_{12} = -5.406 \times 10^{-23}$$

$$C_{14} = 9.678 \times 10^{-27}, C_{16} = -6.960 \times 10^{-31}$$

〔ステップ3〕次に、ステップ3では、ステップ2にてレンズ面が計測された各レンズが保持枠にそれぞれ保持されるように保持ユニットを組み立て、図4または図5に示す如く、組み立て上がった各保持ユニットを所定の順序で鏡筒に落とし込みながら投影光学系PLが組み立てられる。この組み立て工程時において、各レンズの光学面（レンズ面）の間隔に関する情報を、保持ユニットと共に鏡筒内に収納されるワッシャ（3A～3E、5A～5D）の厚さを加味しながら工具（マイクロメータ等）を用いて計測し、計測した結果をコンソール等の入力系6を介してコンピュータ、計算機等の演算系7のメモリー部に記憶させる。

〔ステップ4〕ステップ4において、ステップ3にて組み立てられた直後の投影光学系PLの収差は、図7および図8に示すテストマスク等を用いて計測され、その時に像面湾曲が図9の曲線aに示すように発生している。

〔ステップ5〕このため、ステップ5では、投影光学系PLの調整に先立って、コンピュータ、計算機等の演算系7により、メモリー部に記憶された2つの情報（各

レンズの面形状に関する情報（表3に示す光学データ）および組み立て工程にて得られた各レンズのレンズ面の間隔に関する情報）に基づいて、メモリー部内に予め記憶された光学基本データを修正する。そして、演算系7は、その修正された光学基本データの情報と、投影光学系PLに残存する諸収差に関する収差量に関する情報とに基づいて、収差が補正し得る各レンズのレンズ面の間隔補正量を算出し、不図示のCRTモニター等の表示系8にて、各レンズのレンズ面の間隔補正量等の情報を表示する。

【0078】この表示された各レンズのレンズ面の間隔補正量に基づいて、図4または図5に示した検査対象となる投影光学系PL内部のワッシャ（3A～3E、5A～5D）の交換によりレンズ間の光軸方向での相対間隔を変化、あるいは光軸に対してレンズを傾斜させる等の調整手法が行われる。これにより投影光学系PLの調整がなされ、図9の各曲線aに示す如き低次の像面湾曲が除去される。この調整工程と平行して、求められた投影光学系PLの各レンズのレンズ面（光学面）の間隔の情

報をコンソール等の入力系6を介してコンピュータ、計算機等の演算系7のメモリ部に記憶させる。

〔ステップ6〕ステップ6では、投影光学系PLの調整によって低次の像面弯曲が除去された後に、投影光学系PLに残存する高次の収差を測定する。

【0079】このときの測定は、ステップ2と同様にテストマスクTR1を用いて検査対象の投影光学系PLの高次の像面弯曲を検出する。本例の場合では、図9の曲線bに示す如く、高次の像面弯曲が図13に示される如く発生している。なお、本例の場合には、説明を簡単にするために、調整工程が完了した段階での投影光学系PLの各レンズの光学面（レンズ面）の間隔は表1のレンズデータに示す如く設計値どおりになっているものとする。

【0080】このステップ6の高次の収差計測工程において、図3に示す如く、計測された投影光学系PLに残存する高次の収差量に関する情報をコンソール等の入力系6を介してコンピュータ、計算機等の演算系7のメモリ部に記憶させる。

〔ステップ7〕

〔第1のサブステップ〕高次の像面弯曲を補正すべき非球面をもとめるに先立って、まず、コンピュータ等の演算系7は、ステップ5の調整工程完了後での投影光学系PLの各レンズの光学面（レンズ面）の間隔に関する情報を用いて、ステップ5の調整工程に先立って得られた投影光学系PLの製造光学データに関する情報（ステップ2にて得られた各レンズのレンズ面の面形状に関する情報およびステップ3の組み立て工程にて得られた各レンズのレンズ面の間隔に関する情報等）に基づいて、修正された投影光学系PLの組上げ時での光学データの情報を再修正して、ステップ5の調整工程完了後における投影光学系PLの製造過程での光学データを再現する。

【0081】ここで、本例の場合には、説明を簡単にするために、調整工程が完了した段階での投影光学系PLの各レンズの光学面（レンズ面）の間隔は、表1のレンズデータに示す如く設計値どおりになっているものとする。このため、コンピュータ等の演算系7は、表1に示す投影光学系PLのデータに表3に示す非球面のデータを加味してレンズデータを更新（修正）する。

【0082】図13には、表1に示す投影光学系PLのデータに表3に示す非球面のデータを加味してレンズデータを更新（修正）した時の像面弯曲の様子を示している。図13に示す像面弯曲の曲線は、ステップ6にて実際に計測された図9の像面弯曲の曲線bと比較して、各像高にてほぼ同じ収差値を示しており、ステップ5の調整工程完了後での投影光学系PLの製造過程での光学データが再現されていることが理解できる。

【0083】次に、以上の如き再現された調整完了時の製造光学データとメモリ部内に記憶された情報として

ステップ6にて得られた投影光学系PLに残存する高次の諸収差に関する収差量に関する情報とに基づき（本例では表1及び表3に示すデータに基づき）、コンピュータ等の演算系7は光線追跡を行って、投影光学系PLに残存する高次の像面弯曲を補正できるような微小非球面を決定する。この時、本例では、第2レンズ群G₂の中間群G_{M1}内の負レンズM₂の物体側の凹形状のレンズ面（第13レンズ面）に、投影光学系PLに残存する高次の像面弯曲を補正できるような微小非球面を設計した例を示している。

【0084】ここで、第2レンズ群G₂の中間群G_{M1}内の負レンズM₂の物体側面（第13レンズ面）に設けるべき非球面のデータを表4に掲げる。なお、表4には、前述の（1）式～（5）式の対応値を併せて示してある。

【0085】

【表4】

r13（負レンズM₂の物体側面）

k=1

C₂= 0.502×10⁻⁷

C₄= -0.687×10⁻¹⁰

C₆= 0.717×10⁻¹³

C₈= -0.605×10⁻¹⁶

C₁₀= 0.308×10⁻¹⁹

C₁₂= -0.870×10⁻²³

C₁₄= 0.128×10⁻²⁶

C₁₆= -0.767×10⁻³¹

S=0.021μm

S(n-1)/λ=0.0430

C=0.00099(1/mm)

d/D=0.1802

第2レンズ群G₂の中間群G_{M1}内の負レンズM₂の物体側の凹面（第13レンズ面）に設けるべき非球面は、図14に示す如く、光軸から最大像高（最大有効径）までの間に2つの変曲点を持つ非球面形状を有しており、レンズ面全面としては、4つの変曲点を有している。このように、非球面全面において、変曲点を4つ以上持つ構成とすることが好ましく、これにより、高次の収差をバランス良く補正することが可能となる。なお、図14は縦軸に非球面形状の変位量を示し、横軸にレンズ面の光軸からの高さを示している。

〔第2のサブステップ〕さて、コンピュータ等の演算系7を用いた光線追跡により求められた表4に示す如き微小非球面を投影光学系PL中の負レンズM₂の物体側の凹面（第13レンズ面）に形成するために、必要に応じて投影光学系PLの1部または全部を分解し、非球面加工を施すべき光学ユニットを取り出す。その後、光学ユニット内のレンズの取り出した後に、負レンズM₂の物体側での凹面（第13レンズ面）に対して非球面加工を図11に示した如きレンズ研磨加工機により行う。

〔第3のサブステップ〕以上の図11のレンズ研磨加工機による加工が完了すると、加工が施された負レンズ M_2 、蒸着工程等により反射防止膜が施された後、保持枠が取り付けられる。そして、最終的に、レンズ研磨加工機により非球面加工されたレンズを保持する光学ユニットを投影光学系PLに組み込む。

【0086】そして、組み込み完了した段階での像面歪曲を図15に示す。図15に示すように、図9の曲線b及び図13に示す如き高次の像面歪曲が除去され、優れた結像性能を持つ投影光学系PLの製造が達成されることが理解できる。以上においては、高次の像面歪曲を補正する非球面を第2レンズ群 G_2 の中間群 G_{M1} 内の負レンズ M_2 の物体側面に設けた例を示したが、次に、高次の歪曲収差（ディストーション）を補正する非球面を設けた第2実施例を説明する。なお、説明を簡単にするために、第2実施例においても、前述の表1に示す基本レンズデータ及び表3に示す投影光学系を構成する各レンズの誤差非球面は、同一であるものとする。従って、表1に示すレンズデータを満たす投影光学系PLを構成する各レンズ並びに各レンズを保持する保持枠、レンズと保持枠とからなる保持ユニットを収納する鏡筒を製造する工程としてのステップ1、ステップ1にて製造されたレンズのレンズ面を形状を計測する工程としてのステップ2、および投影光学系PLを組み立てる工程としてのステップ3は同一であるため説明を省略する。

〔ステップ4〕以上のステップ1～ステップ3の工程を経た後、ステップ4において、ステップ3にて組み立てられた直後の投影光学系PLの収差は、図7および図8に示すテストマスク等を用いて計測され、その時に歪曲収差（ディストーション）が図10の曲線aに示すように発生している。

〔ステップ5〕このため、ステップ5では、投影光学系PLの調整に先立って、コンピュータ、計算機等の演算系7により、メモリ部内に記憶された2つの情報（各レンズでのレンズ面の面形状に関する情報（表3に示す光学データ）および組み立て工程にて得られた各レンズのレンズ面の間隔に関する情報）に基づいて、メモリ部内に予め記憶された光学基本データを修正する。そして、演算系7は、その修正された光学基本データの情報と、投影光学系PLに残存する諸収差に関する収差量に関する情報とに基づいて、収差を補正し得る各レンズのレンズ面（光学面）の間隔補正量を算出し、不図示のCRTモニター等の表示系8にて、各レンズのレンズ面（光学面）の間隔補正量等の情報を表示する。

【0087】この表示された各レンズのレンズ面の間隔補正量に基づいて、図4または図5に示した検査対象となる投影光学系PL内部のワッシャ（3A～3E、5A～5D）の交換によりレンズ間の光軸方向での相対間隔を変化、あるいは光軸に対してレンズを傾斜させる等の調整手法が行われる。これにより投影光学系PLを調整

がなされ、図10の各曲線aに示す如き低次の歪曲収差が除去される。この調整工程と平行して、求められた投影光学系PLの各レンズの光学面（レンズ面）の間隔の情報をコンソール等の入力系6を介してコンピュータ、計算機等の演算系7のメモリ部に記憶させる。

〔ステップ6〕ステップ6では、投影光学系PLの調整によって低次の歪曲収差が除去された後に、投影光学系PLに残存する高次の歪曲収差を測定する。

【0088】このときの測定は、ステップ2と同様にテストマスクTR2を用いて検査対象の投影光学系PLの高次の歪曲収差を検出する。本例の場合では、図10の曲線bに示す如く、高次の像面歪曲が図16に示される如く発生している。なお、本例の場合は、説明を簡単にするために、調整工程が完了した段階での投影光学系PLの各レンズの光学面（レンズ面）の間隔は表1のレンズデータに示す如く設計値どおりになっているものとする。

【0089】このステップ6の高次の収差計測工程において、図3に示す如く、計測された投影光学系PLに残存する高次の収差量に関する情報をコンソール等の入力系6を介してコンピュータ、計算機等の演算系7のメモリ部に記憶させる。

〔ステップ7〕

〔第1のサブステップ〕高次の歪曲収差を補正すべき非球面をもとめるに先立って、まず、コンピュータ等の演算系7は、ステップ5の調整工程完了後での投影光学系PLの各レンズの光学面（レンズ面）の間隔に関する情報を用いて、ステップ5の調整工程に先立って得られた投影光学系PLの製造光学データに関する情報（ステップ2にて得られた各レンズの面形状に関する情報およびステップ3の組み立て工程にて得られた各レンズの光学面の間隔に関する情報等）に基づいて、修正された投影光学系PLの組上げ時での光学データの情報を再修正して、ステップ5の調整工程完了後における投影光学系PLの製造過程での光学データを再現する。

【0090】ここで、第2実施例の場合も、前述の第1実施例と同様に、説明を簡単にするために、調整工程が完了した段階での投影光学系PLの各レンズの光学面（レンズ面）の間隔は、表1のレンズデータに示す如く設計値どおりになっているものとする。このため、コンピュータ等の演算系7は、表1に示す投影光学系PLのデータに表3に示す非球面のデータを加味してレンズデータを更新（修正）する。

【0091】図16には、表1に示す投影光学系PLのデータに表3に示す非球面のデータを加味してレンズデータを更新（修正）した時の歪曲収差の様子を示している。図16に示す歪曲収差の曲線は、ステップ6にて実際に計測された図9の歪曲収差の曲線bと比較して、各像高にてほぼ同じ収差値を示しており、ステップ5の調整工程完了後での投影光学系PLの製造過程での光学デ

ータが再現されている理解できる。

【0092】次に、以上の如き再現された調整完了時の製造光学データとメモリ一部内に記憶された情報としてステップ6にて得られた投影光学系PLに残存する高次の諸収差に関する収差量に関する情報とに基づき（本例では表1及び表3に示すデータに基づき）、コンピュータ等の演算系7は光線追跡を行って、投影光学系PLに残存する高次の歪曲収差を補正できるような微小非球面を決定する。この時、本例では、第1レンズ群G₁の正レンズL₁₁の物体側の凸形状のレンズ面（第1レンズ面）に、投影光学系PLに残存する高次の歪曲収差を補正できるような微小非球面を設計した例を示している。

【0093】ここで、第1レンズ群G₁の正レンズL₁₁の物体側のレンズ面（第1レンズ面）に設けるべき非球面のデータを表5に掲げる。なお、表5には、前述の（1）式～（5）式の対応値を併せて示してある。

【0094】

【表5】

r1（正レンズL₁₁の物体側面）

k=1

C₂= 0.502×10⁻⁷

C₄=-0.392×10⁻¹⁰

C₆= 0.162×10⁻¹³

C₈=-0.471×10⁻¹⁷

C₁₀= 0.921×10⁻²¹

C₁₂=-0.109×10⁻²⁴

C₁₄= 0.696×10⁻²⁹

C₁₆=-0.183×10⁻³³

S=0.024μm

S(n-1)/λ=0.049

C=0.00138(1/mm)

d/D=0

第1レンズ群G₁の正レンズL₁₁の物体側の凸形状のレンズ面（第1レンズ面）に設けるべき非球面は、図17に示す如く、光軸から最大像高（最大有効径）までの間に2つの変曲点を持つ非球面形状を有しており、レンズ面全面としては、4つの変曲点を有している。このように、非球面全面において、変曲点を4つ以上持つ構成とすることが好ましく、これにより、高次の収差をバランス良く補正することが可能となる。なお、図17は縦軸に非球面形状の変位量を示し、横軸にレンズ面の光軸からの高さを示している。

【第2のサブステップ】さて、コンピュータ等の演算系7を用いた光線追跡により求められた表4に示す如き微小非球面を投影光学系PL中の第1レンズ群G₁の正レンズL₁₁の物体側面に形成するために、必要に応じて投影光学系PLの1部または全部を分解し、非球面加工を施すべき光学ユニットを取り出す。その後、光学ユニット内のレンズの取り出した後に、正レンズL₁₁の物体側でのレンズ面（第1レンズ面）に対して非球面加工を図

11に示した如きレンズ研磨加工機により行う。

【第3のサブステップ】以上の図11のレンズ研磨加工機による加工が完了すると、加工が施された正レンズL₁₁は蒸着工程等により反射防止膜が施された後、保持枠が取り付けられる。そして、最終的に、レンズ研磨加工機により非球面加工されたレンズを保持する光学ユニットを投影光学系PLに組み込む。

【0095】そして、組み込み完了した段階での歪曲収差を図18に示す。図18に示すように、図10の曲線b及び図16に示す如き高次の歪曲収差が除去され、優れた結像性能を持つ投影光学系PLの製造が達成されていることが理解できる。以上の各実施例では、像面湾曲と歪曲収差をそれぞれ独立に補正する非球面を示したが、投影光学系に残存する各収差を同時に補正する非球面を少なくとも1面以上形成しても良い。また、本発明による非球面は、像面湾曲、歪曲収差のみならずコマ収差、球面収差、非点収差等の収差やテレセントリック性などの結像特性などを補正することも可能である。さらには、これらの複数の収差等を同時に補正することも可能である。

【0096】さらに、以上の各実施例では、屈折力を持つレンズのレンズ面に非球面を形成した例を示したが、本発明では、平凸レンズの平面側（屈折力が零となる面）または平凹レンズの平面側（屈折力が零となる面）において、投影光学系中に残存する高次の収差を補正する非球面を形成しても良い。さらには、本発明では、投影光学系を反射屈折型の光学系で構成した場合、あるいは投影光学系を反射光学系で構成した場合における少なくとも1つの反射面に、投影光学系中に残存する高次の収差を補正する非球面を形成しても良い。

【0097】また、投影光学系とマスクとの間又は投影光学系と感光性基板（ウエハ）との間において、屈折力が零となる光透過性の平行平板を挿脱可能に構成し、その平行平板の表面において、投影光学系中に残存する高次の収差を補正する非球面を形成しても良い。この場合、以上に述べたステップ1からステップ8まで同じ工程を経ることになるが、投影光学系からの平行平板の取り出し並びに投影光学系への平行平板の取り付けが非常に簡単である。その結果、平行平板を非球面加工する場合には、第2のサブステップにて非球面加工を施すための光学素子を取り出すために必要に応じて投影光学系PLの1部または全部を分解する作業および第3のサブステップにおいて非球面加工、反射防止膜のコーティングが施された光学素子を取りつけるために投影光学系PLを再度組み立て、調整する作業を不要とすることができ作業効率を向上させることができる。

【0098】なお、投影光学系に残存する収差を補正する本発明による非球面は、収差の回転対称な成分のみならず回転非対称な収差成分を除去できることは言うまでもない。このため、本発明による非球面は、光軸に対し

て回転非対称な形状としても良いことは明らかである。
また、以上の各実施例では、マスクパターンを感光性基板に縮小投影する投影光学系に残存する高次の収差を補正する非球面を設けた例を示したが、これに限らず、マスクパターンを感光性基板に等倍、または拡大で投影する投影光学系に残存する高次の収差を補正する非球面を設けても良い。

【0099】以上に示した各実施例では、投影光学系を構成する光学部品の加工精度が緩くても、組み上げた結果物としての投影光学系では高次の収差成分が除去されて高い光学性能を有することになるため、光学部品自体の不良率を低下させ、効率よく投影光学系を製造できる利点がある。また、光学部品の加工精度が今までと同程度であれば、今まで以上に高い光学性能を達成できる利点がある。

【0100】

【発明の効果】以上の如く、本発明によれば、投影光学系を構成する光学部品の不良や、投影光学系自身の不良を招くことなく、高次の収差成分が除去された高い光学性能を持つ投影光学系の効率の良い製造を可能とし得る。このため、本発明では、高次の収差成分が除去し得る投影光学系の製造方法、より微細なマスクパターンを感光性基板に良好に投影露光し得る投影露光装置、さらにはより高い集積度を持つ半導体素子を始めとした各種の素子の製造方法が実現できる。

【図面の簡単な説明】

【図1】図1は本発明による投影露光装置の概略構成する説明するための図である。

【図2】図2は本発明による投影光学系の製造過程を説明するための図である。

【図3】図3は本発明による投影光学系の製造過程の光学データを再現するための過程を示す図である。

【図4】図1に示した投影光学系の保持構造の様子を示す図である。

【図5】図4に示した投影光学系の保持構造とは別の構造を示す図である。

【図6】投影光学系を構成する光学素子の光学面の形状を計測するフィゾー型干渉計の構成を示す図である。

【図7】投影光学系に残存する像面弯曲を計測するためのテストマスクの様子を示す図である。

【図8】投影光学系に残存する歪曲収差を計測するためのテストマスクの様子を示す図である。

【図9】投影光学系に残存する像面弯曲の様子を示す図である。

【図10】投影光学系に残存する歪曲収差の様子を示す図である。

【図11】投影光学系に残存する高次の諸収差を補正する非球面を光学面に形成する非球面加工機の構成を示す図である。

【図12】本発明の実施例にかかる投影光学系のレンズ構成図である。

【図13】図12に示した投影光学系に高次の像面弯曲が残存している様子を示す図である。

【図14】図13に示した高次の像面弯曲を補正するための非球面形状の様子を示す図である。

【図15】図14に示した非球面形状によって高次の像面弯曲が補正されている様子を示す図である。

【図16】図12に示した投影光学系に高次の歪曲収差が残存している様子を示す図である。

【図17】図16に示した高次の歪曲収差を補正するための非球面形状の様子を示す図である。

【図18】図17に示した非球面形状によって高次の歪曲収差が補正されている様子を示す図である。

【図19】走査型投影露光装置の概略的な構成を示す図である。

【符号の説明】

R..... マスク

W..... ウエハ

PL..... 投影光学系

1、4A～4E、..... 鏡筒

2A～2E..... 保持枠

3A～3E、5A～5D..... ワッシャ

L₁～L₅..... レンズ

G₁..... 第1レンズ

G₂..... 第2レンズ

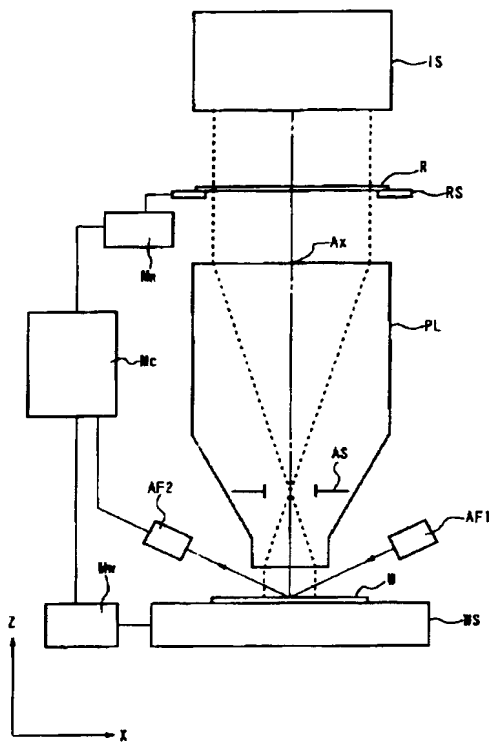
G₃..... 第3レンズ

G₄..... 第4レンズ

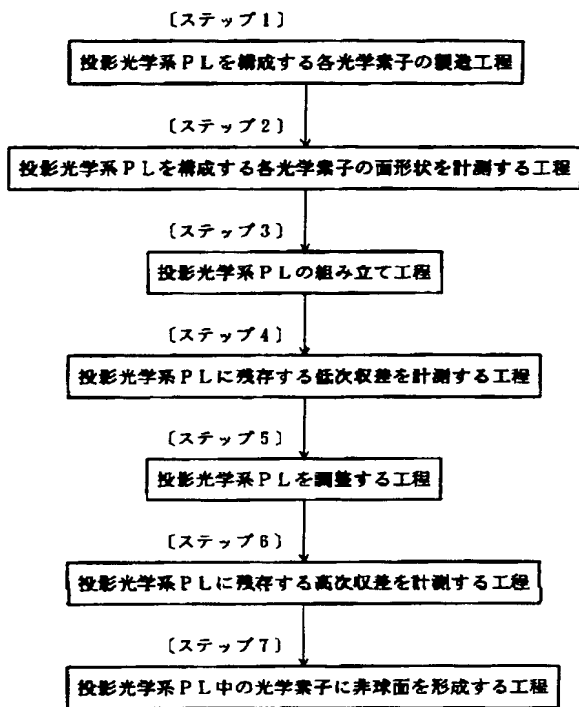
G₅..... 第5レンズ

G₆..... 第6レンズ

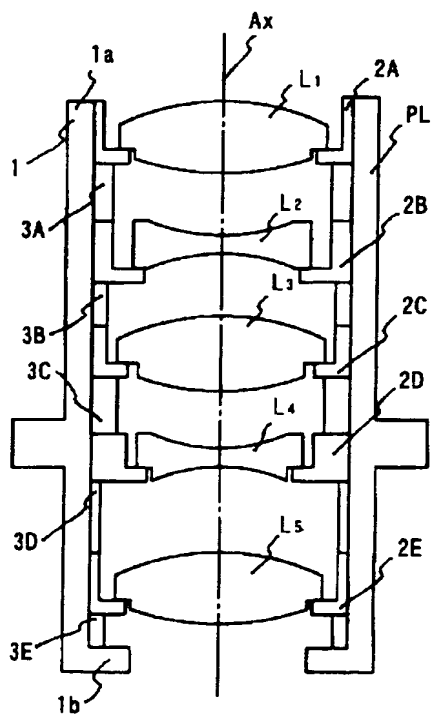
【図 1】



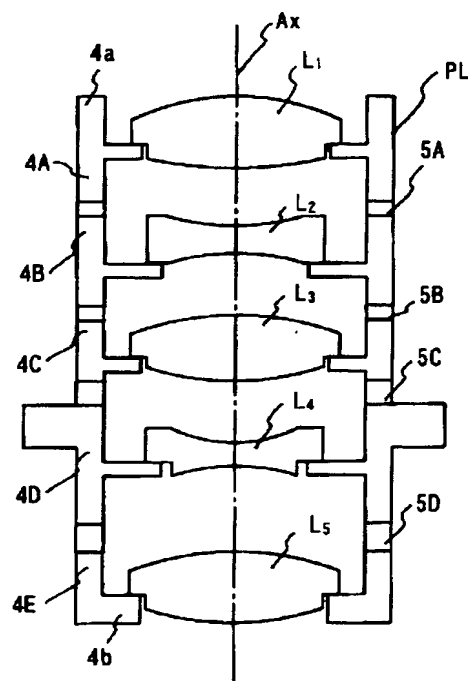
【図 2】



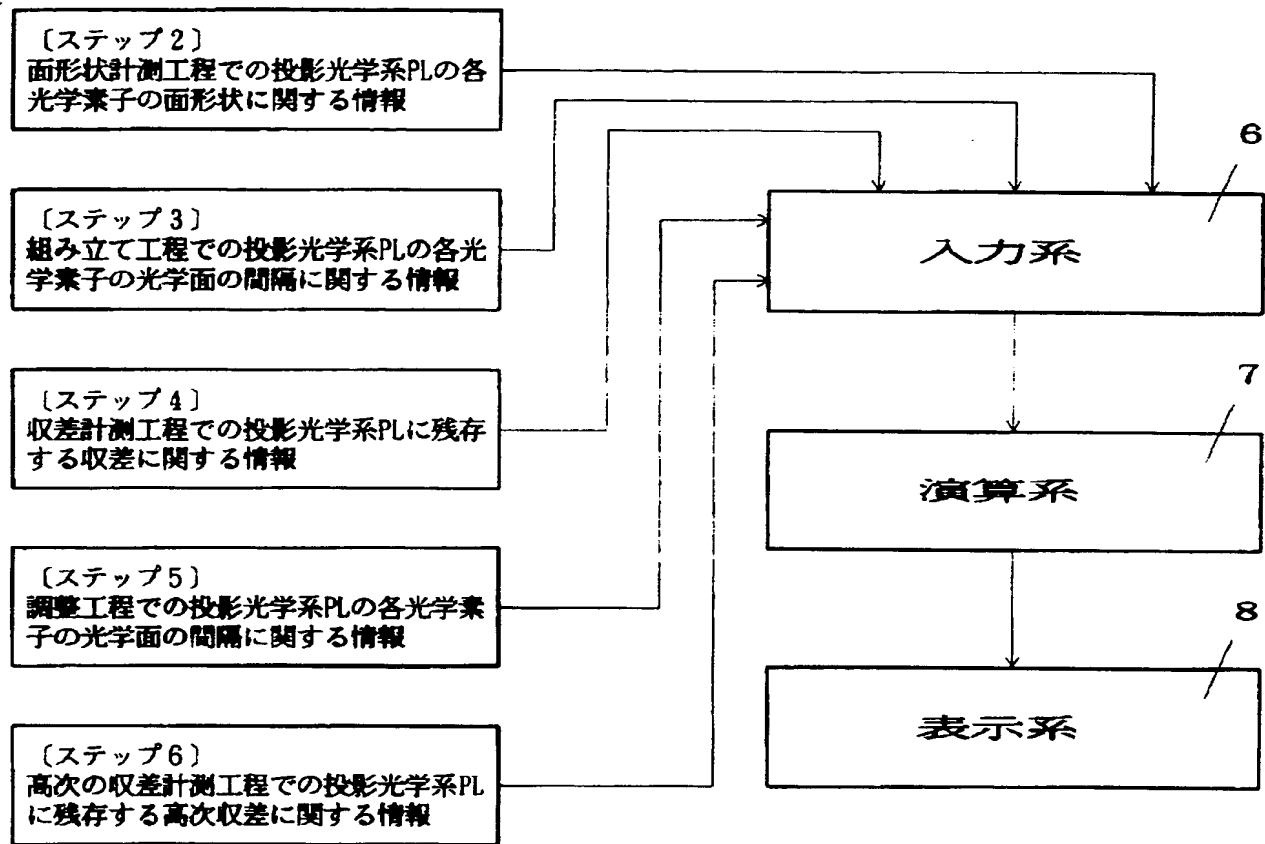
【図 4】



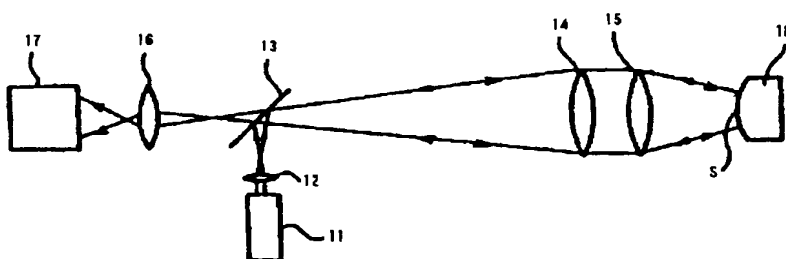
【図 5】



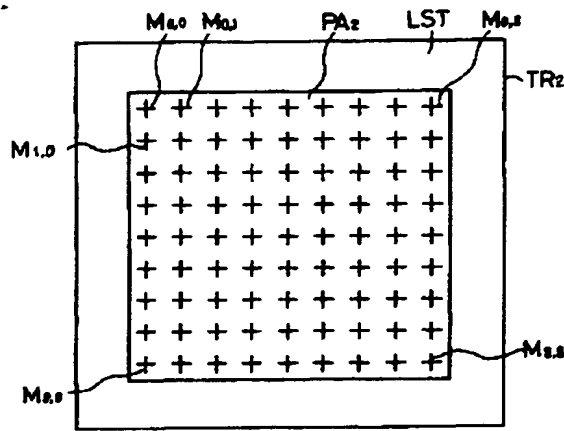
【図3】



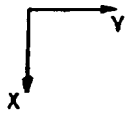
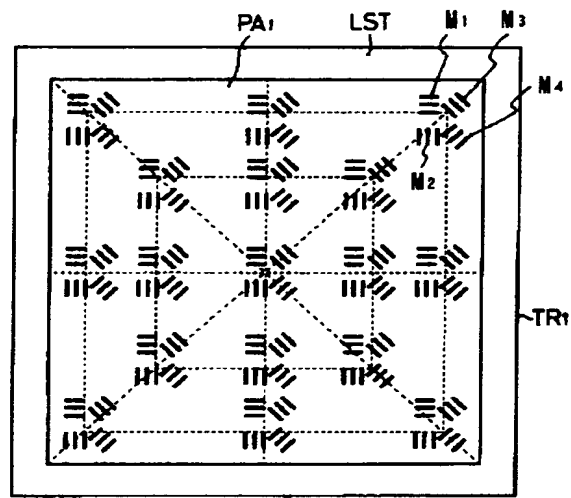
【図6】



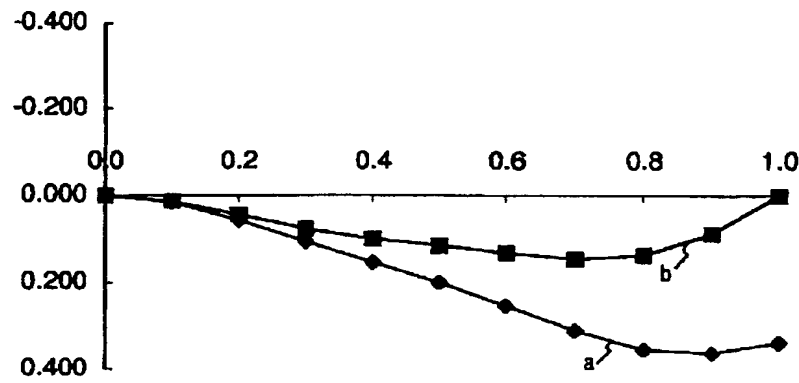
【図 7】



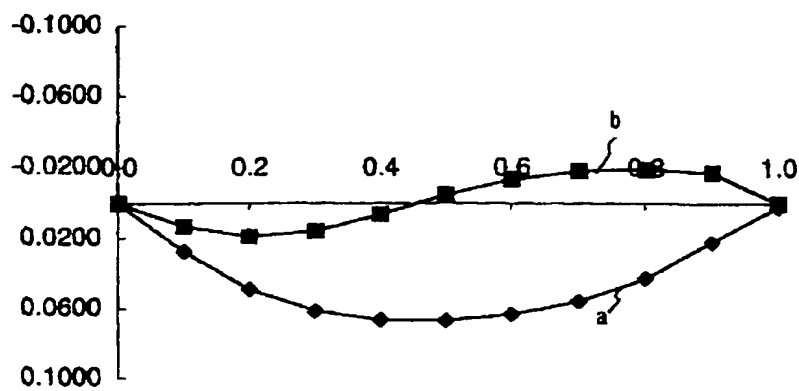
【図 8】



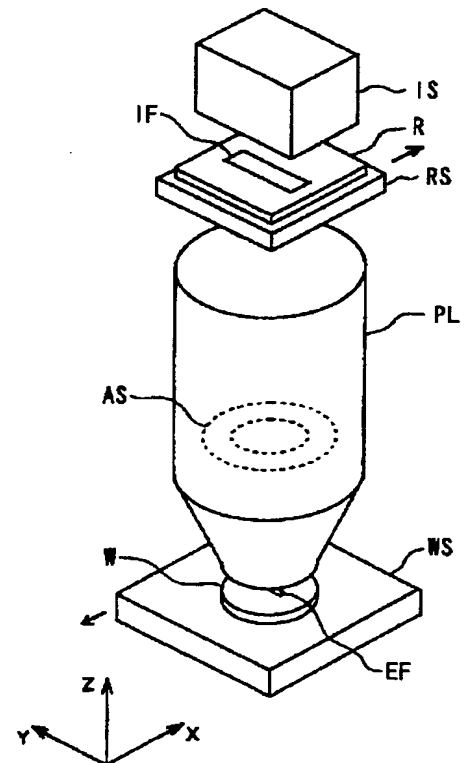
【図 9】



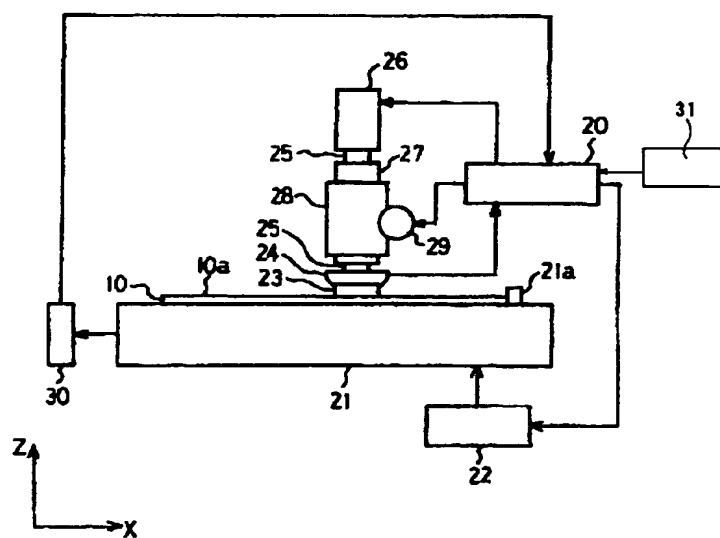
【図 10】



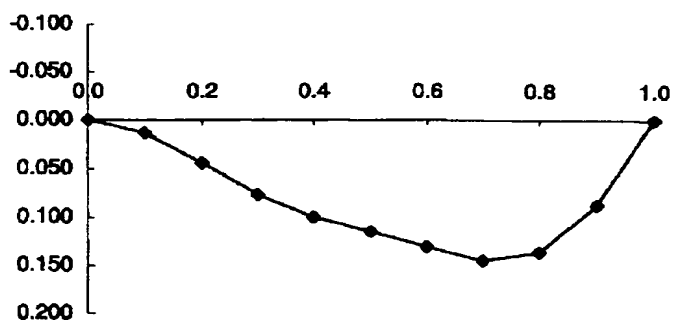
【図 19】



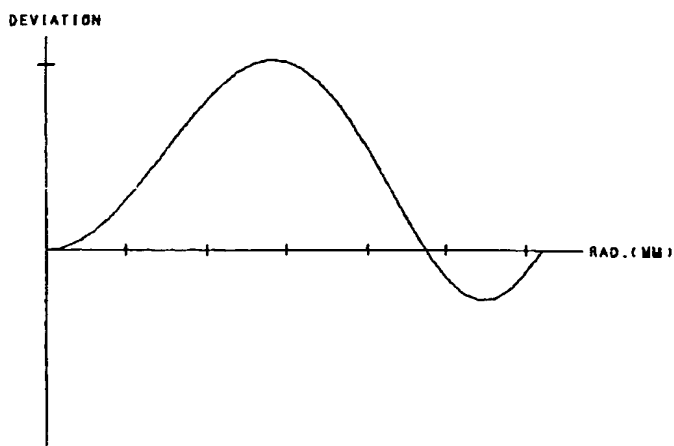
【図 1 1】



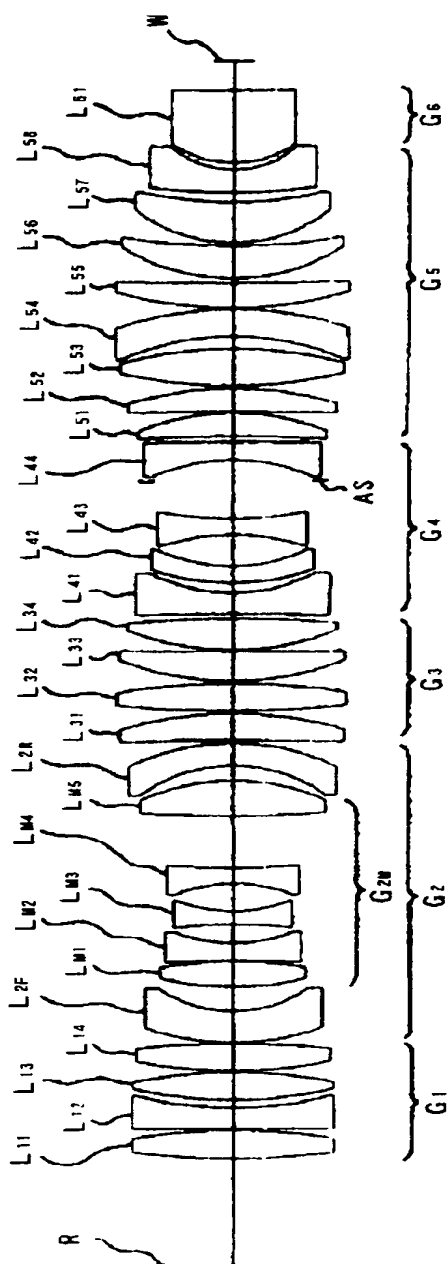
【図 1 3】



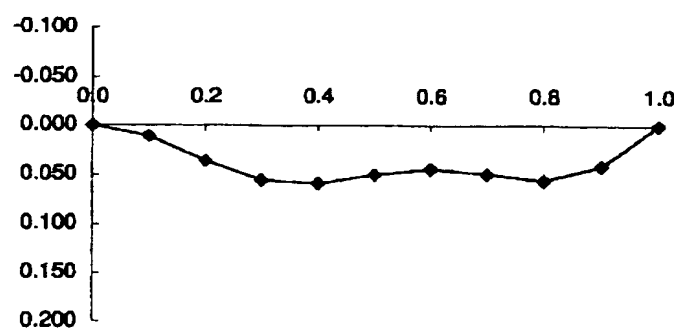
【図 1 4】



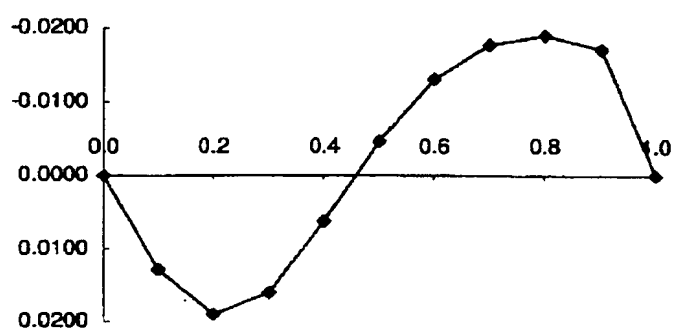
【図 12】



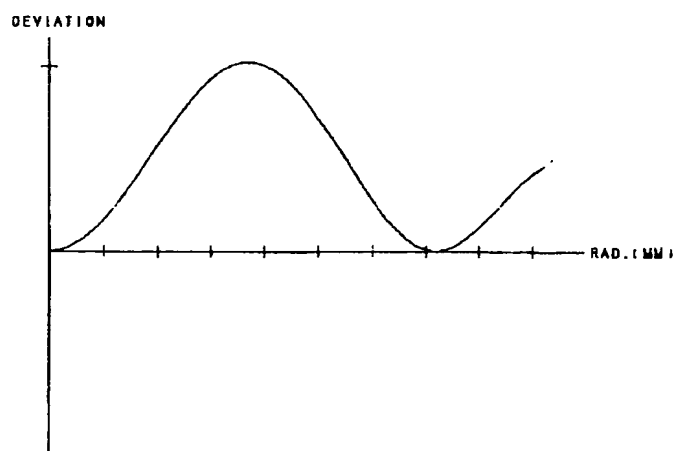
【図 1 5】



【図 1 6】



【図 1 7】



【図 1 8】

